

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

JEFERSON KALCKMANN GILGEN

OTIMIZAÇÃO DA ESCALA DE OPERADORES DE EQUIPAMENTOS EM TERMINAIS
PORTUÁRIOS: APLICAÇÃO AO PORTO ITAPOÁ

Joinville
2017

JEFERSON KALCKMANN GILGEN

OTIMIZAÇÃO DA ESCALA DE OPERADORES DE EQUIPAMENTOS EM TERMINAIS
PORTUÁRIOS: APLICAÇÃO AO PORTO ITAPOÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Transportes e
Logística, no curso Engenharia de Transportes
e Logística da Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler

Co-orientadora: Prof^a Vanina Macowski
Durski Silva

Joinville
2017

RESUMO

As operações portuárias demandam alocar colaboradores em diferentes tipos de equipamentos. O Porto Itapoá em Santa Catarina possui cinco tipos de equipamentos (TT, RTG, RS, EV e PT) que exigem a alocação de recursos humanos para operação em quatro equipes com turnos de 12 horas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estabelecer a escala desses operadores de equipamentos para minimizar as despesas com a contratação de recursos humanos. Um modelo matemático de programação linear inteira foi desenvolvido para identificação do número mínimo de operadores necessários e a escala de horários das equipes de trabalho. Esse modelo foi aplicado a conjuntos de dados como instâncias de teste de pequeno porte para análise do desempenho e verificação da sua eficácia na resolução do problema proposto e, posteriormente, foi aplicado em instâncias reais das quais foi possível diminuir em até 3 operadores contratados a equipe de trabalho e gerar uma economia projetada de aproximadamente R\$ 1,67 milhão anuais em um cenário de projeção de expansão das operações portuárias.

Palavras-chave: porto, logística, pesquisa operacional, alocação, equipamentos, programação linear inteira, escala, equipe de trabalho.

ABSTRACT

Allocating workforce in different types of equipments is part of the port operations. The Port Itapoa in Santa Catarina has five types of equipments (TT, RTG, RS, EV e PT) that need to be driven by skilled people separated in four teams during 12 hours operation. Along with that, the objective of this paper is establish a workforce scheduling to minimize the cost with hiring people. An integer linear programming model was developed to identify the least number of necessary operators and the team' schedule on job. Therefore, this model was first applied in a testing small array of data to analyse and verify the efficiency of the problem resolution, secondly, it was applied in a real scenario in which it was able to reduce 3 operators in one team and save approximately R\$1,67 million yearly on a scenario of expansion of the port operation.

Keywords: port, logistic, operational research, scheduling, equipments, integer linear programming, shift, workforce.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades enfrentadas durante todos esses anos na jornada universitária e, principalmente, durante a execução deste trabalho final.

Ao meu professor, orientador e amigo, Cassiano Augusto Isler, por todo o suporte, dedicação, incentivo e confiança durante os 18 meses focados na construção deste projeto. Sem a sua competência este projeto não teria alcançado este resultado tão positivo.

À minha coorientadora Vanina Macowski Durski Silva, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Às professoras Elisete Santos da Silva Zagheni, Janaina Renata Garcia e Silvia Lopes de Sena Tagliarenha que nunca mediram esforços para me auxiliar com esclarecimentos técnicos sobre o trabalho de conclusão de curso e, principalmente, elaborar a grade de horários para que eu pudesse frequentar as aulas e trabalhar durante o último semestre letivo e me formar ainda no primeiro semestre de 2017.

À equipe do Porto Itapoá, em especial à Marja Weschenfelder, ao Alexandre da Graça Kunz Ferreira e ao Eduardo Magalhães Mércio, que confiaram em mim e abriram as portas da companhia para que eu pudesse mostrar meu trabalho e realizar este projeto de conclusão de curso.

Aos meus pais e irmã, pelo amor, suporte, incentivo e apoio incondicional que sempre me deram. Sem eles, eu não seria a pessoa e profissional que sou. Sou eternamente grato à eles.

À minha namorada, companheira, Cheyenne Louise Arndt, que, pacientemente, ao longo desses 5 anos universitários sempre esteve ao meu lado me apoiando e me incentivando a dar o meu máximo para que pudesse alcançar resultados ainda maiores ao longo da minha carreira profissional.

Aos meus amigos de infância e os colegas de turma que estão sempre comigo alegrando meus dias e me motivando a buscar sempre a decisão mais sábia.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

"Para ter algo que você nunca teve, é preciso fazer algo que nunca fez."

Chico Xavier

"Insanidade é continuar fazendo sempre as mesmas coisas e esperar resultados diferentes."

Albert Einstein

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Tour Scheduling Problem</i>	15
Figura 2 – Exemplo de Escala Cíclica	16
Figura 3 – Exemplo de alocação de horários em uma indústria de garrafas de vidro.	20
Figura 4 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado.	30
Figura 5 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação em 1 TT e 5 RTG do modelo alterado	32
Figura 6 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 2.	40
Figura 7 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 3.	42
Figura 8 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 4.	45
Figura 9 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 6.	51
Figura 10 – Relação entre <i>gap</i> de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 7.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abordagens de modelos considerando habilidade dos colaboradores	17
Tabela 2 – Técnicas de modelagem do problema de alocação de colaboradores	18
Tabela 3 – Métodos de solução para os modelos do problema de alocação de colaboradores	18
Tabela 4 – Características consideradas para modelagem de programação inteira do problema de escala de horários	19
Tabela 5 – Períodos com intervalos de 42 e 60 minutos na jornada de 12 horas	22
Tabela 6 – Inconsistência na alocação em 5 TT e 1 RTG	28
Tabela 7 – Correção dos períodos dos intervalos t	29
Tabela 8 – Resultado da alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado	31
Tabela 9 – Resultado da alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado sem os períodos $t = 1, 2, 3, 19, 20$ e 21	31
Tabela 10 – Resultado da alocação em 1 TT e 5 RTG do modelo alterado	33
Tabela 11 – Resultado da alocação em 4 TT	34
Tabela 12 – Cenários de aplicação do modelo matemático	36
Tabela 13 – Parâmetros do Cenário 1	37
Tabela 14 – Resultados do Cenário 1	38
Tabela 15 – Escala Carrossel para o Cenário 1	38
Tabela 16 – Parâmetros do Cenário 2	39
Tabela 17 – Resultados do Cenário 2	40
Tabela 18 – Escala Carrossel para o Cenário 2	41
Tabela 19 – Parâmetros do Cenário 3	42
Tabela 20 – Resultados do Cenário 3	43
Tabela 21 – Escala Carrossel para o Cenário 3	44
Tabela 22 – Parâmetros do Cenário 4	45
Tabela 23 – Resultados do Cenário 4	46
Tabela 24 – Escala Carrossel para o Cenário 4	47
Tabela 25 – Parâmetros do Cenário 5	48
Tabela 26 – Resultados do Cenário 5	48
Tabela 27 – Escala Carrossel para o Cenário 5	49
Tabela 28 – Parâmetros do Cenário 6	50
Tabela 29 – Resultados do Cenário 6	51
Tabela 30 – Escala Carrossel para o Cenário 6	52

Tabela 31 – Parâmetros do Cenário 7	53
Tabela 32 – Resultados do Cenário 7	55
Tabela 33 – Escala Carrossel para o Cenário 7	56
Tabela 34 – Parâmetros do Cenário 8	57
Tabela 35 – Resultados do Cenário 8	58
Tabela 36 – Escala Carrossel para o Cenário 8	59
Tabela 37 – Escala Carrossel para o Cenário 8 (continuação)	60
Tabela 38 – Resultado Cenários	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Classificações dos problemas de alocação de colaboradores	15
2.2	Modelagem do problema de alocação de colaboradores	16
2.2.1	Aplicações práticas	19
2.2.2	Aplicações no setor portuário	20
3	ESTUDO DE CASO	22
3.1	Descrição do problema prático	22
3.2	Modelo matemático de programação linear inteira	24
3.3	Análise de Desempenho do Modelo Matemático	27
3.3.1	Alocação em 5 TT e 1 RTG	27
3.3.2	Correção da alocação em 5 TT e 1 RTG	29
3.3.3	Alocação em 1 TT e 5 RTG	31
3.3.4	Alocação em 4 TT	33
3.3.5	Comparação entre alocações	34
4	APLICAÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO	36
4.1	Cenário 1: 23 equipamentos sem navio	37
4.2	Cenário 2: 23 equipamentos com navio	39
4.3	Cenário 3: 33 equipamentos sem navio	41
4.4	Cenário 4: 33 equipamentos com navio	44
4.5	Cenário 5: 43 equipamentos sem navio	48
4.6	Cenário 6: 43 equipamentos com navio	50
4.7	Cenário 7: 63 equipamentos sem navio	53
4.8	Cenário 8: 123 equipamentos com navio	57
4.9	Análise dos resultados	61
5	CONCLUSÃO	63
5.1	Resultado indireto da escala carrossel	64
5.2	Trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade das organizações alcançarem resultados positivos em situações macroeconômicas adversas, maiores esforços são exigidos para melhorar o desempenho das atividades organizacionais mediante os problemas que emergem nessas situações.

A contribuição dos métodos de otimização no campo da Pesquisa Operacional (PO) em diversas áreas do conhecimento possibilitou avanços significativos para a sociedade devido às amplas possibilidades de aplicação (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Segundo TAHA (2008), o desenvolvimento de modelos de representação do mundo real através de variáveis e restrições que orientam o valor final da maximização ou minimização de uma “função objetivo” permite identificar a solução de um problema em seu valor ótimo (exato) ou próxima da otimalidade (heurístico).

O setor portuário é um dos beneficiados pelo desenvolvimento dessas técnicas de modelagem, que utiliza a PO para solucionar problemas de transporte de funcionários, transporte de cargas, manutenção de equipamentos, e inclusive, no setor administrativo como a otimização da escala de operadores.

A questão da definição dos horários de início e fim da jornada de trabalho dos operadores de equipamentos no setor portuário – e dos períodos de interrupção programadas para descanso devido à insalubridade inerente à atividade – é um problema complexo pois depende das habilidades e das funções que cada colaborador desempenha na organização.

Essas características podem depender da idade, experiência, conhecimento, capacidade, qualificações e licenças conquistadas pelo colaborador, sendo também importante considerar nos processos os custos das operações, velocidade do trabalho, eficiência, qualidade, restrições de tarefas, substituições e flexibilidade da jornada de trabalho (BRUECKER et al., 2015).

De acordo com Kim et al. (2004), diferentes tipos de equipamentos de transporte de carga são utilizados em terminais portuários, como Portêineres (PT), também conhecido como *ship-to-shore crane* (STS Crane), *Rubber Tyred Gantry Cranes* (RTG), também conhecido como Transtêiner, e *Terminal Tractors* (TT) além de, na prática, existirem o *Reach Stacker* (RS) e a Empilhadeira de Vazios (EV).

Com isso, necessita-se de mão de obra especializada subdividida em equipes para operar esses equipamentos durante o período em que o porto estiver em operação de carregamento e descarregamento de um navio ou organização de cargas no pátio.

O PT é um guindaste de cais com estrutura de pórtico utilizado para carregar e descarregar contêineres de navios. O RTG é um guindaste de pátio rolante com estrutura de pórtico em “U” invertido utilizado para movimentar transversalmente, ou seja, empilhando e desempilhando os contêineres no pátio.

O TT é um equipamento de rolamento de tração, utilizado para movimentar contêineres do PT para o RTG e vice-versa, e o RS é um empilhador de contêiner com uma lança e um *spreader* (dispositivo para levantar o contêiner) utilizado para movimentação vertical e horizontal de cargas. Por fim, o EV é um empilhador de contêiner vazios com uma empilhadeira frontal e um *spreader* (SILVA, 2014).

O Porto Itapoá, localizado no litoral norte de Santa Catarina, no município de Itapoá, iniciou suas operações em junho de 2011 e, segundo a Agência Nacional de Transporte Aquaviário (BRASIL, 2016), no ano de 2016 foi considerado o sexto maior Porto do Brasil em movimentação de cargas e o primeiro em qualidade de serviço.

A administração do terminal é realizada por um grupo de empresas privadas, a Portinvest Participações S.A., formada pelo Grupo Batistella e Log-Z, que detém 70% do controle acionário e a Aliança Navegação e Logística, que é responsável por 30% do controle portuário.

O terminal é capaz de movimentar 500 mil *Twenty Foot Equivalent Units* (TEUs) por ano, em um pátio de 156 mil m² com 2.160 tomadas *reefers* (tomadas para contêineres refrigerados), 6 *gates* (portões) de acesso, 6 PTs, 17 RTGs, 2 RSs e 26 TTs. Um projeto de expansão prevê uma capacidade de movimentação de 2 milhões de TEUs anualmente com 13 PTs, 38 RTGs, 7 RSs, 80 TTs, 12 *gates*, e 455 mil m² de pátio (PORTO ITAPOÁ, 2016).

Existem diferentes níveis de operadores para cada um dos equipamentos no terminal descrito, tal que os operadores júnior (JR) operam somente TT, os operadores plenos (PL), operam TT, RS, EV e RTG, e os operadores sênior (SR) operam TT, RTG, RS, EV e PT. Além disso, existem os auxiliares de operação portuária, auxiliares de refrigeração e assistentes de costado que fazem parte da equipe de pátio e cais, e que auxiliam na operação geral do terminal.

O auxiliar de operação portuária ou refrigeração é responsável pelos processos de operação de carga e descarga de navios e movimentação de contêineres, operação de empilhadeira de pequeno/médio porte para execução de suas atividades, vistoria de caminhões e contêineres no Gate, e organização de fluxo de caminhões externos.¹

O assistente de costado é responsável por interpretar o plano de carga e descarga, conferir cargas, registrar movimentações, controlar fluxo de caminhões no cais, realizar inventário de contêineres no pátio e operar empilhadeiras de pequeno/médio porte para execução de suas atividades.¹

¹ Dados obtidos a partir do Estágio Curricular Obrigatório do Curso de Engenharia de Transportes e Logística, do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O Porto Itapoá divide seus colaboradores da área operacional em 4 equipes com escala 4 por 4 (revezamento de colaboradores em turnos de 12 horas diárias em 4 dias consecutivos com folga nos 4 dias seguintes), em uma operação de 24 horas por dia e 7 dias por semana. Nesses casos, o Sindicato dos Trabalhadores exige a empresa contratante a oferecer três intervalos intrajornada para alimentação e descanso, ou seja, 1 hora para almoço e 2 intervalos de 42 minutos durante o período trabalhado.²

No entanto, como a operação do Porto de Itapoá é contínua, é necessário que se tenha um colaborador extra operando o equipamento ou realizando a função enquanto o titular está no intervalo intrajornada. Essa operação é usualmente denominada “rendição”, em que o operador extra rende o equipamento/função durante o intervalo do operador titular.²

Essa rendição demanda tempo também para a equipe administrativa operacional, no caso, o planejador, que precisa alocar os operadores nas funções de rendição sem que haja qualquer falha, pois caso isso aconteça, os operadores podem acabar trabalhando durante o intervalo intrajornada, o que é proibido, ou um equipamento ficará sem operação durante um período.

Assim, o planejador busca minimizar os custos da operação garantindo a manutenção permanente do serviço de carga e descarga de contêiner no navio, e a organização do pátio. Portanto, para que isso aconteça na prática é pertinente considerar a automatização do processo de alocação dos operadores nos respectivos equipamentos respeitando-se as suas habilidades através de um modelo matemático de otimização implementado em uma ferramenta computacional.

Este trabalho visa aplicar conceitos da Pesquisa Operacional no auxílio à tomada de decisão no contexto do planejamento de escalas em um terminal portuário de contêineres. Essa abordagem tem relevância teórica e prática para o problema abordado pois considera técnicas úteis ao planejamento estratégico, ao permitir o dimensionamento de equipes de trabalho, e operacional, ao viabilizar a aplicação recorrente da ferramenta resultante do estudo na alocação diária de operadores aos equipamentos portuários utilizados para o carregamento de navios.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Após esta introdução há o referencial teórico sobre o problema abordado, destacando as premissas que diferentes autores utilizaram para resolver problemas similares. O terceiro capítulo contém a descrição do problema prático, bem como o modelo matemático proposto para resolvê-lo e considerações sobre os resultados obtidos em instâncias de pequeno porte. O capítulo quatro contém os resultados dos cenários de aplicação do modelo. Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se a conclusão sobre o modelo proposto e os resultados obtidos, bem como as considerações sobre extensões deste estudo.

² Dados obtidos a partir do Estágio Curricular Obrigatório do Curso de Engenharia de Transportes e Logística, do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estabelecer a escala de operadores de equipamentos para movimentação de cargas no Porto Itapoá para minimizar as despesas com recursos humanos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o escopo da operação de equipamentos para movimentação de contêineres em terminais portuários;
- Desenvolver um modelo matemático de programação linear inteira mista para representar o problema de escala de operadores;
- Implementar o modelo matemático em linguagem computacional apropriada, associado a um *solver* para resolver modelos dessa natureza;
- Aplicar o modelo matemático ao Porto Itapoá em diferentes cenários de operação a fim de avaliar a eficiência do modelo em diversas situações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os estudos identificados na literatura que abordam problemas de alocação de colaboradores. Além disso, o capítulo é subdividido em duas seções, a primeira de classificação desses problemas e a segunda com as modelagens propostas e respectivas aplicações práticas em diferentes áreas do conhecimento, inclusive no setor portuário.

Segundo Bruecker et al. (2015), o planejamento de horários de equipes de trabalho é uma tarefa recorrente para os gestores de uma organização, pois alocar corretamente os funcionários em atividades específicas permite identificar quando e como devem executar suas funções e avaliar a necessidade de contratação ou demissão de mão-de-obra especializada.

Para Castillo, Joro e Li (2009), esse planejamento tem o objetivo de identificar a melhor alocação de turno dos colaboradores para adequar a operação de uma empresa à variação da demanda de tempo de serviço dos clientes mantendo os custos no menor nível possível e satisfazendo todas as regulamentações pertinentes. Para solucionar a primeira etapa desses problema, Castillo-Salazar, Landa-Silva e Qu (2012) identificaram os atributos mais comuns dos cenários e os métodos para solucionar problemas de escala de pessoal.

Por outro lado, Ernst et al. (2004) afirmam que escala de pessoal, ou listagem, é o processo de construção de tabelas de tempo para uma equipe, atendendo a demanda variável no tempo e os serviços exigidos pela organização.

Para Alfares (1998), a escala de equipe de trabalhadores é muito útil e aplicável em organizações que operam 24 horas por dia durante 7 dias na semana devido à necessidade de de descanso semanal para os colaboradores. Como essa alocação é feita em turnos e dias variáveis, surgem problemas complexos para definição dos horários de trabalho e de descanso dos trabalhadores.

Totterdell (2005) apresentou dados históricos em relação à predominância de escalas diferenciadas em equipes de trabalho, para evidenciar os problemas de descanso intrajornada de colaboradores em horários diferenciados, evidenciando que horários e condições não convencionais de trabalho são comuns, por exemplo, turnos longos durante a noite e finais de semana devido a questões de preferências pessoais.

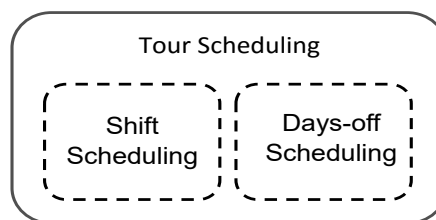
Além disso, o autor afirma que, como o corpo humano está acostumado ao trabalho sob a luz do dia e descanso durante a noite, essa mudança de horário acarreta em disfunções mentais e físicas que prejudicam consideravelmente a saúde

dos colaboradores após longas jornadas, aumentando a fadiga, reduzindo a motivação e, conseqüentemente, a produtividade e eficiência das operações.

2.1 Classificações dos problemas de alocação de colaboradores

De acordo com Rocha (2013), os problemas de escala de equipe podem ser tratados separadamente como problemas de troca de turno (*shift scheduling*) e de tempo de descanso (*days off scheduling*), ou simultaneamente como um *tour scheduling problem* conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – *Tour Scheduling Problem*.



Fonte: Rocha (2013, p. 12).

Os primeiros estudos de escala de colaboradores pelo *tour scheduling problem* foram realizados por Dantzig (1954) utilizando modelagem matemática sob um Problema de Programação Linear de Programação Inteira (PI) para resolver um problema com horizonte de planejamento diário.

A partir disso, com o intuito de expandir o horizonte de planejamento para uma semana, Alfares (2004) desenvolveu um modelo matemático para solucionar o problema de escala do tipo *tour scheduling* baseado no modelo original criado por Dantzig (1954). Esse modelo foi assim classificado pois exige a especificação do dia da semana e horário nesse dia em que cada colaborador deve trabalhar. Problemas desse tipos são contínuos se o período de trabalho no dia é de 24 horas e descontínuos se menor que 24 horas.

A classificação de um problema em contínuo ou descontínuo pode aumentar a sua complexidade dependendo do número de fatores e regras operacionais, como, por exemplo, a classificação do colaborador de acordo com o nível de habilidade, nível de aprendizado, salário, disponibilidade e horas de trabalho. Outro fator que pode aumentar essa complexidade é o planejamento do tempo mínimo de duração do intervalo de descanso, que pode variar entre 15 minutos e 8 horas (ALFARES, 2004).

Segundo Rocha (2013), outra estratégia para classificação de problemas de escalas é em relação aos requisitos de demandas, denominadas escalas rotativas cíclicas (*cyclical scheduling*), que ocorrem quando as demandas são regulares e, conseqüentemente, as escalas são repetitivas. Um exemplo é a escala de motoristas de empresas de transporte público e pilotos de avião.

Nas empresas de transporte público, o colaborador realiza a mesma escala diariamente, alterando somente o itinerário se necessário, ou seja, é possível planejar antecipadamente a escala sem prejudicar a operação. Com isso, o colaborador também pode planejar seus dias de descanso com antecedência.

Por outro lado, nas companhias aéreas, as escalas dos pilotos e comissários de bordo são planejadas com maior antecedência pois cada aeronave necessita de uma equipe à bordo. Neste caso, como há inúmeros destinos distintos e simultâneos, diversas aeronaves devem ser alocadas para atender às demandas da companhia. Portanto, o fato é que em ambos os casos a empresa consegue prever com antecedência significativa a escala que o operador realizará ao longo de um período.

Escalas cíclicas têm vantagens de:

[...] providenciar uma distribuição igualitária dos turnos e dias de descanso e estabilidade para todos os colaboradores, visto que todos os funcionários sabem antecipadamente sua escala, tornando possível planejar suas atividades fora do expediente de trabalho de acordo com a futura disponibilidade de folga (ROCHA, 2013, p. 14).

A Figura 2 exemplifica um caso de escala rotativa cíclica em que 5 colaboradores (E1, E2, E3, E4 e E5) têm conhecimento da sua escala para 35 dias, especificando-se os turnos matinal (M), vespertino (A), noturno (N), e os períodos de descanso (espaço vazio).

Figura 2 – Exemplo de Escala Cíclica

Emp/Days	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
E1	M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N
E2	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M
E3	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A	
E4	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N	
E5			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M		N	N		A	A			M	M	

Fonte: Rocha (2013, p. 13).

2.2 Modelagem do problema de alocação de colaboradores

Bruecker et al. (2015) reuniram diversos estudos de problemas de planejamento de equipe de trabalho atribuindo habilidades aos colaboradores. Para esses autores, habilidade é a capacidade de realizar uma atividade adequadamente, podendo ser dividida em duas classes, hierárquica e categórica.

Para os autores, em casos de classe hierárquica, os colaboradores com mais habilidade e experiência desenvolvem melhor as atividades propostas, e isso é levado em consideração na modelagem do problema. Por outro lado, para classe categórica, todos os colaboradores têm o mesmo nível de habilidade para realizar as tarefas.

No primeiro caso, as habilidades dos colaboradores têm efeito direto sobre as restrições de alocação de tarefas, eficiência, qualidade e custo das tarefas envolvidas e, portanto, quando habilidades são incluídas no problema a dificuldade para encontrar uma solução satisfatória é maior.

Outro fator que dificulta a solução de um problema de escala de operadores segundo suas habilidades é a homogeneidade dos períodos de trabalho (BRUECKER et al., 2015). Problemas homogêneos são mais simples pois todos os colaboradores trabalham em tempo integral porém, quando alguns colaboradores trabalham em tempo integral e outros em tempo parcial, diferentes impactos podem ser gerados se a variável de decisão de um modelo consiste em solucionar um problema de número de colaboradores durante um intervalo de tempo ou para alocar individualmente colaboradores em funções e horários específicos.

De acordo com o autor supracitado, um dos impactos que podem ser gerados considerando-se habilidades é o aumento do número de restrições para solucionar um problema de escala de horários mesmo que o número de variáveis permaneça inalterado.

A Tabela 1 apresenta diferentes autores que abordaram o problema de escala de horários considerando as habilidades dos operadores (*skill modeling*) sob duas perspectivas combinadas: inclusão das habilidades nas restrições (*skills in constraints*) ou na função objetivo do modelo (*skills in objective function*); e restrições para realização de uma tarefa (*task restrictions*) ou através de medidas de desempenho baseadas nas habilidades (*skill based on performance efficiency measures*).

Tabela 1 – Abordagens de modelos considerando habilidade dos colaboradores

	Habilidades nas restrições	Habilidades na função objetivo
Restrições de habilidades	Krishnamoorthy, Ernst e Baatar (2012), Techawiboonwong, Yenradee e Das (2006), Bard e Purnomo (2005a).	Sadjadi et al. (2011), Maenhout e Vanhoucke (2013), Günther e Nissen (2010).
Habilidades por medidas de eficiência	Eitzen, Panton e Mills (2004), Heimerl e Kolisch (2010), Thompson e Goodale (2006).	Li e Li (2000), Wongwai e Malaikrisanachalee (2011), Wu, Hsu e Lai (2011).

Fonte: Adaptado de Bruecker et al. (2015, p. 10).

Do ponto de vista de métodos de modelagem e solução do problema de escala de horários, a Tabela 2 apresenta as principais técnicas utilizadas por diferentes autores para modelagem do problema conforme a classificação de (BRUECKER et al., 2015): programação por objetivo (*goal programming*), programação linear, programação linear inteira, programação linear inteira mista, programação não-linear, simulação de eventos discretos e modelos combinados de simulação e otimização.

Tabela 2 – Técnicas de modelagem do problema de alocação de colaboradores

Programação por objetivo	Li e Li (2000), Sampson (2006).
Programação Linear Inteira	Seçkiner, Gökçen e Kurt (2007), Tiwari, Patterson e Mabert (2009), Pastor e Corominas (2010).
Programação Não-Linear	Huang et al. (2009), Bhatnagar, Saddikutti e Rajgopalan (2007), Corominas, Olivella e Pastor (2010).
Programação Linear Inteira Mista	Rong (2010), Heimerl e Kolisch (2010), Firat e Hurkens (2012).
Simulação de Eventos Discretos	Zülch, Rottinger e Vollstedt (2004), Huang et al. (2009).
Simulação e Otimização	Helber e Henken (2010).

Fonte: Adaptado de Bruecker et al. (2015, p. 12)

Ainda os autores Bruecker et al. (2015) apresentaram na Tabela 3 os métodos de solução utilizados por diferentes autores para solucionar os modelos não-lineares para obtenção de soluções exatas como: geração de colunas, relaxação Lagrangeana e decomposição de Benders. Por outro lado, os métodos heurísticos apresentados por aqueles autores, utilizados para obtenção de soluções viáveis de boa qualidade para o problema, foram abordados por diferentes autores através da aplicação de *Simulated Annealing*, Busca Tabu, Algoritmo Genético e Algoritmos Gulosos.

Tabela 3 – Métodos de solução para os modelos do problema de alocação de colaboradores

Geração de Colunas	Eitzen, Panton e Mills (2004), Bard e Purnomo (2005a), Bard e Purnomo (2005b).
Relaxação Lagrangeana	Krishnamoorthy, Ernst e Baatar (2012).
Decomposição de Benders	Detienne et al. (2009).
<i>Simulated Annealing</i>	Thompson e Goodale (2006), Wu, Hsu e Lai (2011).
Busca Tabu	Drezet e Billaut (2008).
Algoritmo Genético	Cai e Li (2000), Aickelin, Burke e Li (2009), Sadjadi et al. (2011).
Algoritmos Gulosos	Brucker et al. (2010), Carrasco (2010), Drezet e Billaut (2008).
Outras heurísticas	Wongwai e Malaikrisanachalee (2011), Firat e Hurkens (2012), Eitzen, Panton e Mills (2004).

Fonte: Adaptado de Bruecker et al. (2015, p. 12).

Segundo Rocha (2013), os problemas de escala de horários sob a perspectiva da PI podem ser modelados considerando os fatores, objetivos e restrições conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Características consideradas para modelagem de programação inteira do problema de escala de horários

FATORES	Período de planejamento adotado; Horas operacionais da organização. Características dos trabalhos. Flexibilidade de turnos.
OBJETIVOS	Minimizar o custo de mão obra total. Maximizar a porcentagem das horas trabalhadas estipuladas no contrato ou minimizar a porcentagem de horas não estipuladas. Minimizar o intervalo entre alocações e demanda. Minimizar o intervalo entre alocações e preferências dos funcionários. Minimizar o tamanho da equipe de colaboradores. Balancear a carga de trabalho entre todos os trabalhadores. Maximizar a satisfação do funcionário.
RESTRIÇÕES	Número de alocações necessárias/permitidas por intervalo. Obrigações pelas leis trabalhistas ou preferências dos funcionários. Finais de semana periódicos de descanso, compensação de alocações em finais de semana por dias de descanso durante a semana. Distribuição igualitária de turnos/dias de descanso entre colaboradores.

Fonte: Adaptado de Rocha (2013, p. 14).

2.2.1 Aplicações práticas

Uma aplicação de PI foi utilizada por Bard, Binici e Silva (2003) para modelar o problema de *tour schedule* no Serviço Postal dos Estados Unidos da América, com o objetivo de reduzir o tamanho da equipe e construir uma escala semanal para cada colaborador. O modelo inclui colaboradores com jornada de trabalho em tempo integral ou parcial, e as principais restrições incluem requisitos de dois dias de descanso consecutivos, dias com horários iniciais variáveis e participação de colaboradores em regime diferenciado de trabalho meio período.

Outra aplicação dessa abordagem foi utilizada por Rocha (2013) em uma indústria de garrafas de vidro que opera 365 dias no ano, 24 horas por dia, através de dois fornos com 4 linhas cada. Os colaboradores foram distribuídos em 4 equipes homogêneas de 36 pessoas, que trabalham em turnos de 8 horas por dia, além de existir um número máximo e mínimo pré definido de dias consecutivos de trabalho. A partir disso, o gerente da empresa desejava aumentar a quantidade de equipes para aumentar a flexibilidade e promover equidade nas escalas dos colaboradores. A Figura 3 ilustra os resultados para um cenário de 35 dias.

Eitzen, Panton e Mills (2004) descreveram um problema de escala de pessoal com habilidades múltiplas em uma estação de energia em Queensland, Austrália. A maior preocupação foi essencialmente com os requisitos do processo de dias de descanso, linha de construção de trabalho e alocação de turno para os colaboradores,

de modo que permanecessem usufruindo de todas as suas habilidades múltiplas. A previsão de demanda da empresa necessitava de uma preparação de escala de demanda com 12 semanas de antecedência.

Figura 3 – Exemplo de alocação de horários em uma indústria de garrafas de vidro.

																																				Total			
Teams/Days	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	M	A	N	
T1	M			N	N	N	N					A	A	A		M	M	M	M			N	N	N					A	A	A	A		M	M	7	7	7	21
T2	A	A	A	A		M	M	M			N	N	N	N					A	A	A		M	M	M	M			N	N	N					7	7	7	21
T3	N	N	N					A	A	A	A		M	M	M			N	N	N	N					A	A	A		M	M	M	M			7	7	7	21
T4		M	M	M	M			N	N	N					A	A	A	A		M	M	M			N	N	N	N					A	A	A	7	7	7	21
T5					A	A	A		M	M	M	M			N	N	N					A	A	A	A	M	M	M			N	N	N	N	7	7	7	21	

Fonte: Rocha (2013, p. 60).

Há também aplicações de modelagem nos setores da saúde, como hospitais e clínicas de saúde (WARNER, 1976; BARD; PURNOMO, 2005a; BARD; PURNOMO, 2005b; BESTER; NIEUWOUDT; VUUREN, 2007; CAUSMAECKER; BERGHE, 2011; MAENHOUT; VANHOUCKE, 2013).

Por exemplo, Warner (1976) descreve um sistema de escala de enfermeiras. A função objetivo busca quantificar as preferências individuais de cada enfermeira em relação à duração do tempo de trabalho, padrões rotativos e requisitos de dias de descanso, e o modelo fornece o número mínimo de enfermeiras em cada classe de habilidade para serem alocadas em turnos de 4 a 6 semanas de período de escala.

2.2.2 Aplicações no setor portuário

Mais especificamente no setor portuário, Kim et al. (2004) desenvolveram um algoritmo para escalar operadores de equipamentos como PT, RTG e TT no terminal portuário de contêineres de Pusan, Coréia do Sul. As principais restrições para minimização do menor número de colaboradores em cada período de tempo foram o tempo máximo de operação por operador por turno, o tempo mínimo e máximo de operação contínua para um operador, tipos de equipamentos que podem ser alocados para cada operador, e a disponibilidade de períodos para cada operador ou parte de equipamento.

Segundo esses autores, os problemas de escala de colaboradores em terminais portuários podem ser subdivididos hierarquicamente em três problemas: o primeiro de ordenação da lista de operadores, em que os turnos que cada operador deve trabalhar são definidos; o segundo de definição do tempo de operação dos equipamentos; e o terceiro de alocação de um operador para cada equipamento durante o tempo total programado para a operação dos equipamentos.

Na pesquisa de Kim et al. (2004) o PT, por exemplo, é crítico para um terminal, pois influencia diretamente na escala de atracação dos navios e, portanto, recebe

operadores alocados prioritariamente em relação aos outros equipamentos.

Do ponto de vista operacional, sob a perspectiva de operação do Porto Itapoá, objeto deste estudo, o planejamento e alocação dos horários dos trabalhadores aos equipamentos (PT, RTG, RS, EV, e TT) e dos auxiliares de pátio e cais é feita manualmente, exigindo um esforço diário excessivo por parte do responsável pela alocação dos operadores nas funções requisitadas para o dia, sem contar com a possibilidade de erros.

Nesse contexto, a utilização de um modelo matemático de programação linear inteira para alocação de colaboradores com diferentes habilidades em equipamentos portuários permitirá otimizar a escala dos operadores do Porto Itapoá. Essa decisão pode reduzir tanto custos operacionais para a companhia quanto balancear a carga de trabalho entre todos os colaboradores. Desse modo, a escala poderá ser controlada em tempo real e caso haja qualquer alteração nos horários dos navios é possível construir uma nova escala rapidamente.

Neste capítulo foram esclarecidos alguns dos principais estudos existentes relativos aos problemas de alocação de colaboradores. A partir desses trabalhos foi possível entender as dificuldades encontradas por alguns autores ao abordar esses problemas, bem como as soluções que melhor se adequam ao problema estudado no presente trabalho, cuja modelagem matemática é proposta no próximo capítulo.

3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado o problema prático de alocação de colaboradores em equipamentos portuários e o modelo matemático proposto para solucioná-lo. Além disso, o capítulo é subdividido em duas seções, a primeira explica todos os parâmetros e variáveis do modelo, inclusive, função objetivo e restrições desenvolvidas, e a segunda apresenta uma análise de desempenho do modelo matemático de modo a detalhar adaptações necessárias e a forma de interpretação as soluções encontradas.

3.1 Descrição do problema prático

Considerando que o Porto Itapoá passe por um processo de expansão devido ao crescimento expressivo em movimentação de cargas, algumas mudanças são necessárias para que se mantenha a produtividade sem elevar sobremaneira os custos operacionais. No cenário atual, o setor de operações atua no sistema quatro por quatro, ou seja, é subdividido em quatro equipes que operam em turnos de 12 horas, diariamente, conforme explicitado na introdução deste trabalho.

Contudo, essa jornada de 12 horas é subdividida em intervalos de 42 e 60 minutos conforme a Tabela 5, para respeitar a obrigação do acordo trabalhista de disponibilizar dois intervalos de 42 minutos para descanso durante a jornada de trabalho e um intervalo de 60 minutos para almoço.

Tabela 5 – Períodos com intervalos de 42 e 60 minutos na jornada de 12 horas

Intervalos 42 min			Intervalos 60 min			Intervalos 42 min		
Período t	Início	Fim	Período t	Início	Fim	Período t	Início	Fim
1	07:00	07:42	6	10:30	11:30	11	15:30	16:12
2	07:42	08:24	7	11:30	12:30	12	16:12	16:54
3	08:24	09:06	8	12:30	13:30	13	16:54	17:36
4	09:06	09:48	9	13:30	14:30	14	17:36	18:18
5	09:48	10:30	10	14:30	15:30	15	18:18	19:00

Fonte: Autoria própria.

Nessas condições, o colaborador trabalha efetivamente 9,6 horas e permanece

2,4 horas em parada obrigatória. Entretanto, como os equipamentos não podem parar a operação é necessário que um colaborador substitua o outro durante esse período de descanso pelo processo de “rendição”.

Os operadores responsáveis pela rendição realizam um esforço físico quatro vezes maior que os operadores titulares ao subirem e descerem as escadas de acesso aos equipamentos. Por exemplo, o RTG possui 108 degraus e cada operador leva, em média, três minutos para subir e descer as escadas de acesso à cabine de operação. Com isso, muitos operadores exaustos em realizar essa tarefa diária, ao final do expediente são solidários com os colegas de trabalho e pedem para não serem mais rendidos. Isso gera uma carga de trabalho desproporcional da equipe e, conseqüentemente, insatisfação por parte dos colaboradores.

Desse modo, para evitar essa situação, a empresa decidiu pela substituição do sistema de rendição, com operadores titulares e rendedores, por um modelo de escala denominado “carrossel”.

Na escala carrossel, a cada quatro períodos o operador é obrigado a parar para descansar por um intervalo de 42 ou 60 minutos. Assim que esse operador retorna do descanso, ele precisa render outro operador em um equipamento específico e iniciar seu novo turno de quatro períodos. Assim, todos os colaboradores se revezam de modo equivalente em mais de dois equipamentos e, ao final do expediente, todos terão trabalhado o mesmo tempo e com a mesma carga de trabalho.

Essa decisão fez com que a construção diária da escala se tornasse uma tarefa árdua e morosa para o colaborador responsável pelo planejamento da escala, visto que a empresa tem aumentado gradativamente a sua equipe de colaboradores. Entretanto, vislumbrou-se que este problema pode ser mitigado pela proposta de um modelo matemático de programação linear inteira de alocação de colaboradores aos equipamentos conforme abordado no capítulo anterior deste trabalho.

Os valores numéricos sobre parâmetros do modelo matemático foram obtidos a partir de um projeto interno da companhia em estudo, que tinha como objetivo otimizar a escala dos operadores a partir de um fator de rendição e foi utilizado como embasamento para o presente estudo.

Ademais, informações adicionais para a formulação do modelo foram obtidas com os analistas e supervisores de execução e monitoramento de desempenho do Porto Itapoá e, além disso, a operação dos equipamentos foi acompanhada pelo autor durante 12 horas para compatibilização do modelo às condições práticas.

As informações sobre os custos operacionais foram obtidas com o setor de Gestão e Desenvolvimento de Pessoas do Porto Itapoá, monitoradas pelo setor Jurídico para acompanhamento de questões legais associadas ao processo.

3.2 Modelo matemático de programação linear inteira

Seja J o número de operadores disponíveis para operação de K equipamentos em um conjunto de T períodos da jornada de trabalho, tal que o operador $j \in \{1, \dots, J\}$ opera um equipamento $k \in \{1, \dots, K\}$ em um período $t \in \{1, \dots, T\}$.

Seja JR o número de operadores júnior, PL o número de operadores pleno e SR o número de operadores sênior disponíveis para operação dos equipamentos no sistema, tal que é possível estabelecer a relação $J = JR + PL + SR$.

Além disso, considere um equipamento auxiliar estabelecido no modelo matemático, caracterizado por AUX , utilizado para alocar operadores que obrigatoriamente deveriam retornar do intervalo intrajornada no sistema de escala carrossel, mas que não tem equipamento disponível para iniciar o trabalho.

Essa obrigatoriedade do operador retornar para a operação de um equipamento necessariamente após 42 minutos ou uma hora de descanso ocorre pelo fato de que não é interessante para a companhia que um colaborador retorne do intervalo intrajornada e fique ocioso por indisponibilidade de equipamento. Dependendo da quantidade de equipamentos solicitados para a operação de 12 horas, não é possível alocar todos os operadores em equipamentos durante toda a jornada de trabalho devido às restrições da escala carrossel construída. Para evitar essa situação, portanto, criou-se um equipamento virtual como uma opção de alocação dos operadores nesses casos, doravante caracterizado pela sigla AUX .

Nessas condições, seja TT o número de *Terminal Tractors*, RTG a quantidade de *Rubber Tyred Gantry Craners*, RS o número de *Reach Stackers*, EV o número de Empilhadeiras Vazias, e PT a quantidade de Portêineres necessários para a operação da empresa em uma jornada específica, então o número total de equipamentos por ser definido por $K = TT + RTG + RS + EV + PT + AUX$.

Seja C_j um parâmetro de custo de contratação de um operador segundo as suas habilidades conforme caracterizado em (3.1) e B_{jk} uma matriz de caracterização de habilidades tal que $B_{jk} = 1$ se o operador j tem habilidade para operar o equipamento k , e $B_{jk} = 0$, caso contrário. Além disso, considere um parâmetro E_{kt} binário que estabelece a utilização de um equipamento em um período específico, tal que $E_{kt} = 1$ se o equipamento k deve ser operado no período t .

$$C_j = \begin{cases} R\$ 4.391,00, & \forall j \in \{1, \dots, JR\} \\ R\$ 8.325,00, & \forall j \in \{JR + 1, \dots, PL\} \\ R\$ 11.598,00, & \forall j \in \{PL + 1, \dots, SR\} \end{cases} \quad (3.1)$$

Para definir as variáveis de decisão, adotou-se a técnica da modelagem implícita em que variável de decisão é associada a um conjunto de combinações de início do período, duração da escala e janelas de descanso. No entanto, para que

essa técnica funcione é necessário criar restrições que garantam que as janelas de descanso sejam alocadas nas posições corretas (ROCHA, 2013).

Sabendo-se disso, foi realizada uma adaptação do modelo de Isken (2004), que utilizou uma variável de decisão D_{imn} como o número de colaboradores alocados na escala do tipo i , iniciando-a no período m e trabalhando no dia n , para definir as variáveis de decisão do presente modelo.

As variáveis binárias de decisão do modelo são y_j , a qual caracteriza a necessidade de contratação do operador j pela empresa para operação de uma jornada de trabalho específica, e x_{jk}^t , a qual define se j deve iniciar a operação do equipamento k no período t dessa jornada, conforme caracterizado em 3.2 e 3.3.

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o operador } j \text{ é contratado pela empresa;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$x_{jk}^t = \begin{cases} 1, & \text{se o operador } j \text{ começa a operar o equipamento } k \text{ no período } t; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.3)$$

O modelo matemático de programação linear inteira proposto para resolver o problema de alocação de operadores aos equipamentos do Porto Itapoá, foi definido de acordo com alguns itens da Tabela 4 ilustrada no capítulo 2. A função objetivo minimiza o custo de mão de obra total e as restrições garantem o número de alocações necessárias/permitidas por intervalo, as obrigações pelas leis trabalhistas, e distribuição igualitária de turnos/dias de descanso entre os colaboradores. Portanto, o modelo é caracterizado entre 3.4 e 3.15 a seguir.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{j=1}^J y_j \cdot c_j \quad (3.4)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^J x_{jk}^t \leq \sum_{j=1}^J M \cdot y_j \quad \forall \quad k \in K, t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{jk}^t \leq 1 \quad \forall \quad j \in J, t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t'=1}^T x_{jk}^{t'} \leq 5 \cdot E_{kt} \quad \forall \quad t \in T, k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T x_{jk}^t \leq 4 \quad \forall \quad j \in J \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t'=t}^{t+3} x_{jk}^{t'} = E_{kt} \quad \forall \quad t \leq |T|-3, k \leq |K - AUX| \quad (3.9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t'=t}^{t+3} x_{jk}^{t'} \leq E_{kt} \quad \forall \quad t \leq |T|-3, |K - AUX| < k \leq K \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t'=t}^{t+4} x_{jk}^{t'} = y_j \quad \forall \quad j \in J, t \leq |T|-4 \quad (3.11)$$

$$x_{jk}^t \leq B_{jk} \quad \forall \quad j \in J, k \in K, t \in T \quad (3.12)$$

$$y_{j+1} \leq y_j \quad \forall \quad j \in J - \{JR + 1, JR + PL + 1\} \quad (3.13)$$

$$x_{jk}^t \in \{0, 1\} \quad \forall \quad j \in J, k \in K, t \in T \quad (3.14)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall \quad j \in J \quad (3.15)$$

A função objetivo (3.4) corresponde aos custos de contratação de operadores, resultante da multiplicação do respectivo custo C_j pela variável y_j relativa à sua contratação. O conjunto de restrições (3.5) garante que se o operador j for alocado em um equipamento k pelo menos uma vez, ele deve ser usado durante o máximo de t possível na operação. O parâmetro M é um número inteiro suficientemente grande para que a restrição a que está associado seja efetiva.

Na sequência, o conjunto de restrições (3.6) garante que existe no máximo 1 operador j em cada equipamento k em cada período t , e o conjunto de restrições (3.7) garante que existem no máximo cinco escalas iniciando em cada equipamento k diferente de AUX durante um período T .

O conjunto de restrições (3.8) garante que todo operador j inicia uma escala no máximo quatro vezes em qualquer equipamento k . O conjunto de restrições (3.9) garante que o operador j que iniciou a escala em k irá permanecer nesse equipamento até $t+3$, com exceção dos equipamentos AUX . O conjunto de restrições (3.10) garante que o operador j será alocado em um equipamento AUX somente se for necessário e irá permanecer nesse equipamento, no máximo, até $t+3$.

O conjunto de restrições (3.11) garante que todos os operadores j que iniciam a escala no período t iniciam a próxima escala em $t+5$. O conjunto de restrições (3.12) assemelha-se ao modelo de Mohan (2008) e garante que o operador j tem habilidade para operar o equipamento k e as restrições (3.13) garantem que

o modelo escolherá os operadores j disponíveis em J sequencialmente. Finalmente, (3.14) e (3.15) estabelecem o domínio das variáveis de decisão.

O modelo matemático foi implementado na linguagem C++ com a biblioteca do solver Gurobi pelo IDE (Integrated Development Environment) Microsoft Visual Studio (MICROSOFT, 2017). O Gurobi (GUROBI OPTIMIZATION, INC., 2016) é um *software* com um conjunto de *solvers* capazes de resolver modelos matemáticos de programação linear, programação linear inteira mista, programação quadrática inteira mista, programação quadrática, programação quadrática restrita, e programação quadrática restrita inteira mista.

O Gurobi inicialmente encontra uma solução inicial relaxada para os modelos de programação linear inteira considerando que todas as suas variáveis podem assumir valores contidos no conjunto de número reais. Em seguida, o *solver* executa iterações sucessivas em busca da solução inteira que mais se aproxima dessa solução relaxada, a qual é admitida como ótima global mediante um critério de parada estabelecido pelo usuário ou um erro (*gap*) em relação à solução inteira mais próxima da relaxada identificada em uma iteração.

Como a quantidade de dados a serem importados para o modelo é elevada, decidiu-se utilizar o *software* Microsoft Office Excel (MICROSOFT, 2016) para declarar as matrizes de dados e importar para o modelo através de arquivos CSV.

A mesma estratégia foi utilizada para a impressão da solução do modelo, cujos resultados são exportados para o Microsoft Office Excel (MICROSOFT, 2016). O modelo exporta os dados e o *log* para dois arquivos CSV, os quais são exportados para as planilhas eletrônicas, permitindo a análise dos resultados obtidos através de gráficos e tabelas.

3.3 Análise de Desempenho do Modelo Matemático

O modelo matemático proposto foi aplicado considerando-se três conjuntos de dados de pequeno porte para avaliação do desempenho e verificação da eficácia em termos dos resultados obtidos.

3.3.1 Alocação em 5 TT e 1 RTG

O primeiro cenário propõe a possibilidade de alocação de dez operadores JR e dez operadores PL em cinco equipamentos TT e um RTG para $T = 15$. Esse cenário foi criado para analisar a capacidade do modelo em resolver problemas com quantidades de equipamentos não múltiplos de quatro, ou seja, verificar a utilização do equipamento AUX . Além disso, é possível identificar a alocação mais adequada em termos de custos de contratação considerando as habilidades dos operadores JR e PL .

Na solução ótima encontrada para este cenário, ilustrada na Tabela 6, foi possível encontrar uma inconsistência do modelo ao alocar o operador 7 (*JR*) no equipamento 6 (*RTG*) durante o intervalo $t = 1, 2$ e 3. Verificou-se que esse erro ocorre quando há necessidade de concatenar os três últimos períodos da jornada com os três primeiros períodos da próxima jornada de 12 horas.

Em outras palavras, quando um operador realiza o primeiro intervalo intrajornada em $t = 1$ ou $t = 5$ e realiza o terceiro intervalo intrajornada no período $t = 11$ ou $t = 15$ (como os operadores 1 e 5 na Tabela 6), a última escala finaliza com quatro períodos completos. Entretanto, os operadores que realizam o primeiro intervalo intrajornada em $t = 2, t = 3$ ou $t = 4$ realizarão o último intervalo em $t = 12, t = 13$ ou $t = 14$, tendo sua primeira e última escala fracionada. Essa fração na última escala deve ser entendida pelo modelo como uma continuidade da fração na primeira escala.

Tabela 6 – Inconsistência na alocação em 5 TT e 1 RTG

k/t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>TT</i>	1	4	4	4	6	6	6	6	2	2	2	2	5	5	5
	2	6	6	2	2	2	2	5	5	5	5	1	1	1	7
	3	13	13	11	11	11	11	12	12	12	12	3	3	3	4
	4	2	5	5	5	5	3	3	3	3	4	4	4	6	6
	5	11	12	12	12	12	1	1	1	1	7	7	7	13	13
<i>RTG</i>	6	7	7	7	13	13	13	13	11	11	11	11	12	12	12
<i>AUX</i>	7	1	1	1	1	7	7	7	7	–	–	–	–	2	2
	8	3	3	3	3	4	4	4	4	6	6	6	6	11	11
	9	–	–	–	–	–	–	–	–	13	13	13	13	–	–

Fonte: Autoria própria.

Para solucionar este problema estabeleceu-se como alternativa o aumento da jornada T em seis intervalos (três no início e três no fim), de modo que esses intervalos gerados sejam utilizados apenas para que o modelo não fracione a escala e aloque corretamente os quatro períodos consecutivos tanto no início quanto no fim da jornada. Assim, a Tabela 7 representa a escala dos operadores tem início no período $t = 4$ e final no período $t=18$.

Dito isso, deste ponto em diante as seguintes premissas serão utilizadas:

- A jornada T foi substituída de 15 períodos para $T = 21$.
- O modelo foi alterado de modo que as restrições (3.9), (3.10) e (3.11) foram substituídas pelas restrições (3.16), (3.17) e (3.18), respectivamente.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t'=t}^{t+3} x_{jk}^{t'} = E_{kt} \quad \forall \quad t \leq |T|-6, k \leq |K - AUX| \quad (3.16)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t'=t}^{t+3} x_{jk}^{t'} \leq E_{kt} \quad \forall \quad t \leq |T|-6, |K - AUX| \leq k \leq K \quad (3.17)$$

$$\sum_{k=1}^k \sum_{t'=t}^{t+4} x_{jk}^{t'} = y_j \quad \forall \quad j \in J, t \leq |T|-7 \quad (3.18)$$

- Na impressão das escalas dos operadores foram omitidos os períodos $t = 1, 2, 3, 19, 20$ e 21 , os quais representam os tempos adicionais criados a fim de não fracionar a escala, para facilitar a interpretação da solução encontrada, tal que os os períodos e intervalos devem ser interpretados de acordo com a Tabela 7, resultante da alteração da Tabela 5.

Tabela 7 – Correção dos períodos dos intervalos t

Intervalos 42 min			Intervalos 60 min			Intervalos 42 min		
Período t	Início	Fim	Período t	Início	Fim	Período t	Início	Fim
4	07:00	07:42	9	10:30	11:30	14	15:30	16:12
5	07:42	08:24	10	11:30	12:30	15	16:12	16:54
6	08:24	09:06	11	12:30	13:30	16	16:54	17:36
7	09:06	09:48	12	13:30	14:30	17	17:36	18:18
8	09:48	10:30	13	14:30	15:30	18	18:18	19:00

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Correção da alocação em 5 TT e 1 RTG

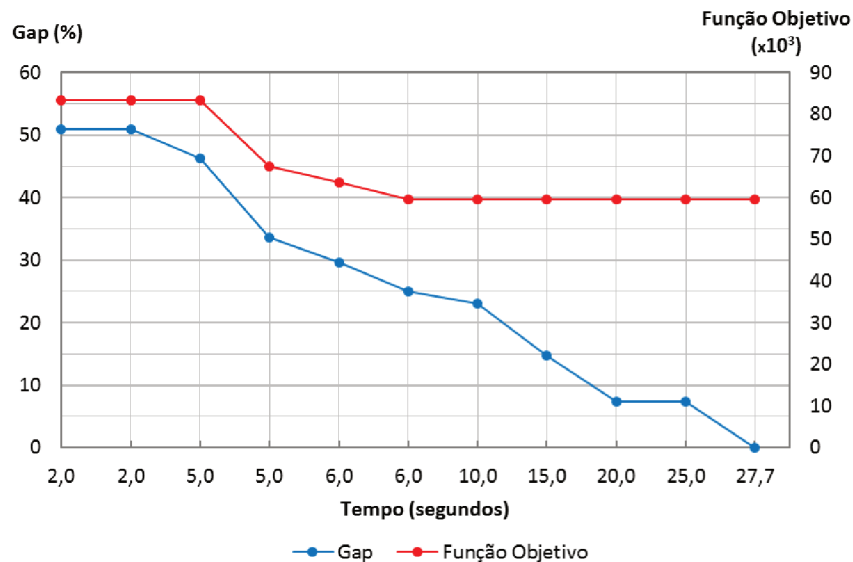
Os operadores JR disponíveis para a operação foram enumerados de 1 a 10 e os operadores PL foram enumerados de 11 a 20 para facilitar a leitura de dados. Os turnos e as paradas obrigatórias foram separadas analogamente ao primeiro modelo.

Adicionalmente, os equipamentos TT requisitados foram enumerados de um a cinco, o equipamento RTG enumerado como 6, e os equipamentos AUX enumerados de 7 a 9.

Pelas considerações indicadas anteriormente, o modelo alterado pelo conjunto de restrições (3.16), (3.17) e (3.18) apresentou 3.800 variáveis binárias (1.080 variáveis binárias adicionais em comparação com o modelo inicial), cuja pré-solução com o Gurobi reduziu para 3.079 variáveis binárias. Foram necessárias 1.371 iterações (0,08 segundos) para obtenção da solução ótima relaxada, e 220.811 iterações (27,65 segundos) para identificação da solução ótima inteira.

A Figura 4 ilustra a relação entre o *gap* e o tempo de processamento, e a relação entre a função objetivo e o tempo de processamento para este cenário. É notável que a solução encontrada para o *gap* menor que 25% foi exatamente a solução final, portanto, para este cenário, a resposta ótima já havia sido encontrada após seis segundos de processamento.

Figura 4 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 apresenta a solução para o primeiro cenário com as devidas alterações do modelo, para $T = 21$ sem a omissão de $t = 1, 2, 3, 19, 20$ e 21 , somente para exemplificar a alteração da solução anterior. Por outro lado, a Tabela 9 ilustra a mesma escala porém omitindo os períodos $t = 1, 2, 3, 19, 20$ e 21 .

A solução ótima relaxada encontrada é igual a R\$37.850,00 e o custo total para a solução inteira é igual a R\$59.646,00. Nessas condições, foram alocados dez colaboradores ($JR = 6$ e $PL = 4$), sendo necessário alocá-los em três equipamentos *AUX* enquanto não houvesse equipamento *TT* ou *RTG* disponível para alocação.

Como o intervalo de equipamentos *AUX* não está incluso na restrição 3.9, o modelo não obriga o preenchimento de todos os horários na escala deles, sendo utilizados somente segundo a necessidade de alocação de operadores em outra

função, desde que o operador j tenha habilidade para exercê-la durante aquele período de quatro intervalos t consecutivos.

Tabela 8 – Resultado da alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado

	k/t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
TT	1	4	4	4	4	11	11	11	11	1	1	1	1	12	12	12	12	13	13	13	13	—
	2	14	14	14	14	2	2	2	2	5	5	5	5	6	6	6	6	3	3	3	3	—
	3	—	13	13	13	13	4	4	4	4	11	11	11	11	5	5	5	5	12	12	12	12
	4	—	—	—	1	1	1	1	12	12	12	12	13	13	13	13	14	14	14	14	—	—
	5	—	3	3	3	3	14	14	14	14	2	2	2	2	1	1	1	1	6	6	6	6
RTG	6	—	—	12	12	12	12	13	13	13	13	14	14	14	14	11	11	11	11	—	—	—
AUX	7	—	—	6	6	6	6	—	—	—	—	—	3	3	3	3	4	4	4	4	—	—
	8	—	—	—	—	—	—	3	3	3	3	4	4	4	4	—	—	—	—	—	—	—
	9	—	—	—	5	5	5	5	6	6	6	6	—	—	—	2	2	2	2	—	—	—

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultado da alocação em 5 TT e 1 RTG do modelo alterado sem os períodos $t = 1, 2, 3, 19, 20$ e 21

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TT	1	4	11	11	11	11	1	1	1	1	12	12	12	12	13	13
	2	14	2	2	2	2	5	5	5	5	6	6	6	6	3	3
	3	13	13	4	4	4	4	11	11	11	11	5	5	5	5	12
	4	1	1	1	1	12	12	12	12	13	13	13	13	14	14	14
	5	3	3	14	14	14	14	2	2	2	2	1	1	1	1	6
RTG	6	12	12	12	13	13	13	13	14	14	14	14	11	11	11	11
AUX	7	6	6	6	—	—	—	—	—	3	3	3	3	4	4	4
	8	—	—	—	3	3	3	3	4	4	4	4	—	—	—	—
	9	5	5	5	5	6	6	6	6	—	—	—	2	2	2	2

Fonte: Autoria própria.

Com relação aos quatro operadores PL escalados (11, 12, 13 e 14), nenhum trabalhou exclusivamente no RTG , tal que todos foram obrigados a trabalhar durante alguma escala em equipamentos TT . Além disso, os operadores 2, 3, 4, 5 e 6 foram escalados em equipamentos AUX , ou seja, eles estão disponíveis naqueles períodos para exercerem outra função.

Neste caso, por exemplo, como há cinco operadores JR disponíveis, se a empresa tiver a necessidade, é interessante alocá-los em dois novos equipamentos TT ou empilhadeiras de pequeno porte, aumentando a eficiência operacional do sistema.

3.3.3 Alocação em 1 TT e 5 RTG

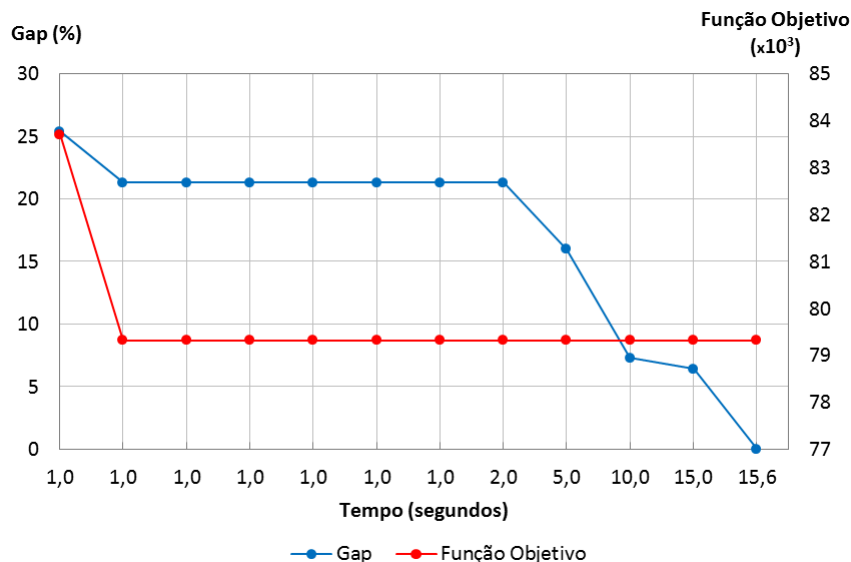
Os operadores JR disponíveis para a operação foram enumerados de 1 a 10 e os operadores PL foram enumerados de 11 a 20. O equipamento TT requisitado foi

enumerado como 1, os equipamentos *RTG* enumerados de 2 a 6, e os equipamentos *AUX* enumerados de 7 a 9.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 3.800 variáveis binárias, reduzidas a 2.359 na pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 1.580 iterações em 0,08 segundos para se chegar à solução ótima relaxada, e 65.987 iterações em 15,55 segundos para encontrar a solução ótima inteira.

A Figura 5 ilustra a relação entre o *gap* e o tempo de processamento, e a relação entre a função objetivo e o tempo de processamento para este cenário. É notável que a solução encontrada para o *gap* menor que 21,3% foi exatamente a solução final, portanto, para este cenário, a resposta ótima já havia sido encontrada após um segundo de processamento.

Figura 5 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação em 1 TT e 5 RTG do modelo alterado



Fonte: Autoria própria.

A solução ótima relaxada encontrada é igual a R\$57.520,00 de custo total e a solução exata é igual a R\$79.316,00. Nesta solução foi necessário alocar dez colaboradores com $JR = 1$ e $PL = 9$. Entretanto, como havia apenas seis equipamentos, o modelo exigiu a alocação em três equipamentos *AUX* enquanto não houvesse equipamento *TT* ou *RTG* disponível.

Interessante notar que para conseguir reduzir o custo da operação, o modelo alocou um operador *JR* apenas em quatro períodos do equipamento *TT*, o restante da jornada esse operador foi alocado em equipamentos *AUX*, devido a falta de habilidade para operar equipamentos *RTG*.

A Tabela 10 retrata os operadores atribuídos a cada equipamento nos períodos sucessivos da jornada omitindo $t = 1, 2, 3, 19, 20$, e 21 para facilitar a leitura do

resultado.

Tabela 10 – Resultado da alocação em 1 TT e 5 RTG do modelo alterado

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	1	1	1	1	1	13	13	13	13	19	19	19	19	12	12	12
<i>RTG</i>	2	19	19	16	16	16	16	14	14	14	14	17	17	17	17	13
	3	13	13	13	15	15	15	15	16	16	16	16	14	14	14	14
	4	17	17	17	17	11	11	11	11	15	15	15	15	16	16	16
	5	16	14	14	14	14	17	17	17	17	11	11	11	11	15	15
	6	11	11	11	19	19	19	19	12	12	12	12	18	18	18	18
	7	15	15	12	12	12	12	18	18	18	18	1	1	1	1	–
<i>AUX</i>	8	12	–	–	–	–	–	–	–	–	13	13	13	13	19	19
	9	–	18	18	18	18	1	1	1	1	–	–	–	–	–	11

Fonte: Autoria própria.

Com relação aos nove operadores *PL* escalados, apenas três foram alocados no equipamento *TT*. Além disso, os operadores 1, 11, 12, 13, 15, 18 e 19 foram escalados em equipamentos *AUX*, ou seja, eles estão disponíveis naqueles períodos para exercerem outra função. Como pode ser observado na Tabela 10, por exemplo, como há seis operadores disponíveis, se a empresa tiver à disposição, é interessante alocar esses operadores em dois novos equipamentos desde que eles tenham habilidade. Com isso, consegue-se aumentar a eficiência da operação toda.

3.3.4 Alocação em 4 TT

Neste cenário propõe-se a alocação de dez operadores *JR* em quatro *TT* durante 21 períodos, sendo o cenário utilizado para validar a premissa de que a cada quatro equipamentos k é necessário alocar cinco operadores j na escala carrossel.

A Figura 11 ilustra o resultado da escala para os operadores *JR* durante a jornada de 12 horas, que nada mais é do que a representação visual da "rendição". Nessa lista, os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a $TT = 4$.

O segundo conjunto de dados proposto foi a alocação de dez operadores *JR* em quatro *TT* durante a jornada T com 21 períodos, considerando-o cenário base do modelo. O objetivo deste cenário é validar a premissa de que a cada quatro equipamentos k é necessário a alocação de cinco operadores j , que representa a equivalência do modelo para o sistema de rendição atualmente praticado pela empresa, mas implementado sob a forma de escala carrossel.

Os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 4 e os operadores *JR* disponíveis para a operação foram enumerados de um a dez e coloridos para facilitar a leitura do resultado. Ao operador 1 foi atribuída a cor laranja, ao operador 2 amarelo, ao operador 3 verde, ao operador 4 roxo e ao 5 azul.

O detalhamento da alocação dos operadores é: o operador 4 inicia a sua

jornada de 12 horas de trabalho no equipamento 1 às 7:00h e permanece lá até 9:48h. Às 9:48h é obrigado a entrar em intervalo intrajornada de 42 minutos, sendo rendido pelo operador 3. Ao retornar do intervalo de 42 minutos, aquele operador retoma no equipamento 4 e permanece nele das 10:30h às 14:30h. Neste momento, o operador 4 é rendido novamente pelo operador 3 para iniciar seu intervalo de almoço de 60 minutos. No final do intervalo, o operador 4 retorna para o equipamento 3 e permanece nele das 15:30h às 18:12h, que é o horário de início do último intervalo intrajornada de 42 minutos na jornada de 12 horas. Portanto, o operador 4 finaliza o dia descansando.

As escalas dos outros operadores ocorrem de maneira análoga. A única diferença é o fato de 3 dos 5 operadores escalados realizarem a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam em quatro equipamentos por jornada de 12 horas ao invés de três.

Tabela 11 – Resultado da alocação em 4 TT

		k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TT	1	4	4	4	4	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	
	2	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5	
	3	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5	4	4	4	4	3	
	4	2	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	1	1	

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 1.480 variáveis binárias, reduzidas a 1.269 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 642 iterações em 0,03 segundos para a solução ótima relaxada, e 1.580 iterações em 0,23 segundos para a solução ótima inteira.

Para este cenário, a solução ótima inteira é igual a solução ótima relaxada, equivalente a R\$21.955,00 de custo total mensal e foram alocados cinco operadores *JR* para suprir essa necessidade. Além disso, não foi necessário alocar equipamentos *AUX*, o que de fato valida a premissa de que cinco operadores são necessários para operarem quatro equipamentos durante a escala.

Portanto, 40% dos colaboradores realizaram 25% menos esforço físico que os demais, mesmo que todos realizem três paradas obrigatórias durante a jornada de 12 horas de operação. Isso ocorre pelo fato de que 60% dos colaboradores realizam a primeira e a última escala fracionada para adequação da escala carrossel.

3.3.5 Comparação entre alocações

Os cenários descritos neste capítulo são exemplos teóricos de aplicação do modelo matemático proposto pois não são verificados na prática de operação da empresa em estudo. No entanto, eles foram criados para verificação das respostas da modelagem mediante diferentes condições básicas de número de equipamentos e

operadores com respectivas habilidades.

Na comparação entre o cenário com cinco *TT* e um *RTG* com o cenário com um *TT* e cinco *RTG*, dez operadores foram alocados em seis equipamentos *TT* e *RTG*, sendo adicionados dois equipamentos *AUX*. A principal diferença entre eles é que no segundo cenário foram alocados nove operadores *PL* e no primeiro foram alocados quatro operadores dessa categoria. Essa diferença justifica-se pela não obrigatoriedade de alocação de operadores mais habilidosos e custosos em equipamentos que demandam mão de obra menos especializada.

Neste capítulo foram esclarecidos os critérios para concepção do modelo matemático de programação linear inteira que resolve o problema de alocação de operadores em equipamentos portuários. Assim, no capítulo seguinte serão apresentados os cenários propostos para avaliar o desempenho do modelo em comparação com a alocação realizada na prática pela companhia.

4 APLICAÇÕES DO MODELO MATEMÁTICO

A partir da validação do modelo matemático caracterizada no capítulo anterior em instâncias de pequeno porte foram estabelecidos cenários de aplicação para operações de grande escala. Esses cenários foram definidos para demonstrar a eficácia do modelo para resolver o problema de alocação de operadores em duas, três e quatro equipes operando um navio ou somente organizando o pátio, ou seja, sem operação de *PT*.

Além disso, pensando na expansão planejada do Porto Itapoá foram elaborados cenários com seis equipes trabalhando no pátio sem operação de navio (sem *PT*) e 12 equipes trabalhando em um ou mais navios (com *PT*).

A Tabela 12 caracteriza os parâmetros dos oito cenários que foram criados e analisados neste trabalho em termos de número de equipamentos a serem operados e colaboradores disponíveis para a realização das tarefas de operação do sistema.

Tabela 12 – Cenários de aplicação do modelo matemático

Cenário	Operadores				Equipamentos								Períodos
	JR	PL	SR	J	TT	RTG	EV	RS	PT	AUX	K	T	
1	30	20	10	60	12	4	2	2	–	3	23	21	
2	30	20	10	60	12	4	1	1	2	3	23	21	
3	30	20	10	60	16	8	2	2	–	3	33	21	
4	30	20	10	60	16	7	1	1	3	3	33	21	
5	30	20	10	60	24	12	2	2	–	3	43	21	
6	30	20	10	60	24	10	1	1	4	3	43	21	
7	60	50	12	122	39	17	2	2	–	3	63	21	
8	100	60	20	180	72	29	3	4	12	3	123	21	

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos ao se aplicar o modelo nos cenários considerados são análogos aos cenários explanados no capítulo anterior, ou seja, as soluções mostram o custo total da operação durante o período *T*, o tempo de execução para obtenção dessa solução, o *gap* de otimalidade em casos em que não foi possível obter a solução ótima após um longo tempo de processamento, a quantidade de operadores *JR*, *PL* e *SR* necessários para realizar a operação e a quantidade de equipamentos *AUX* quando solicitados.

Os operadores disponíveis foram organizados sequencialmente quanto ao índice *j*, tal que *JR* foram enumerados de 1 a *JR*, *PL* entre *JR* + 1 e *JR* + *PL* e *SR* enumerados de *JR* + *PL* + 1 a *J*.

Analogamente, os equipamentos TT requisitados foram enumerados de 1 a TT , os equipamentos RTG , enumerados de $TT + 1$ a $TT + RTG$, os equipamentos EV , enumerados de $TT + RTG + 1$ a $TT + RTG + EV$, os equipamentos RS , enumerados de $TT + RTG + EV + 1$ a $TT + RTG + EV + RS$, os equipamentos PT enumerados de $TT + RTG + EV + RS + 1$ a $TT + RTG + EV + RS + PT$, e os equipamentos AUX enumerados de $TT + RTG + EV + RS + PT + 1$ a K .

4.1 Cenário 1: 23 equipamentos sem navio

Os operadores JR disponíveis para a operação, no cenário 1, foram enumerados de 1 a 30, os operadores PL foram enumerados de 31 a 50 e os operadores SR foram enumerados de 51 a 60.

Analogamente, os equipamentos TT requisitados foram enumerados de 1 a 12, os equipamentos RTG , enumerados como 13 a 16, os equipamentos EV , enumerados como 17 a 18, os equipamentos RS , enumerados como 19 a 20 e os equipamentos AUX , enumerados de 21 a 23. Não foram considerados equipamentos PT nesse cenário.

Tabela 13 – Parâmetros do Cenário 1

Cenário	JR	PL	SR	J	TT	RTG	EV	RS	PT	AUX	K	T
1	30	20	10	60	12	4	2	2	–	3	23	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 29.040 variáveis binárias, reduzidas a 20.580 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 7.666 iterações em 10,65 segundos para a solução ótima relaxada, e 64.096 iterações em 28 segundos para a solução ótima inteira.

Neste cenário, conforme mostra a Tabela 14, a solução encontrada pelo modelo foi exatamente igual à escala aplicada na prática pela empresa, equivalente a R\$149.115,00 de custo total mensal.

Esse cenário pode ser considerado uma extensão do cenário base com quatro TT apresentado no capítulo anterior, pois é igual à solução relaxada do modelo matemático de programação linear inteira. Portanto, o único ganho para este cenário é o tempo utilizado pelo analista para construir a escala do dia seguinte.

A Tabela 15 ilustra a escala criada para este cenário. Nela, 15 dos 25 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 14 – Resultados do Cenário 1

Resultados	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	0	–
<i>K</i> utilizado	20	20	0
<i>JR</i>	15	15	0
<i>PL</i>	10	10	0
<i>SR</i>	–	–	–
<i>J</i> utilizado	25	25	0
Custo Total	R\$ 149.115,00	R\$ 149.115,00	0
Tempo(s)	–	287,36	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

Outro fato interessante é que mesmo os operadores *PL* tendo habilidade para operar equipamentos *TT*, o modelo entende que é mais vantajoso alocar os operadores *PL* somente nos *RTG*, *EV* e *RS* ao invés de alocá-los nos equipamentos *TT*. Isso mostra o quão próximo da realidade é a solução gerada pelo modelo matemático.

Tabela 15 – Escala Carrossel para o Cenário 1

	<i>k/t</i>	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	1	8	8	8	5	5	5	5	14	14	14	14	9	9	9	9
	2	13	13	14	14	14	14	9	9	9	9	3	3	3	3	7
	3	5	5	1	1	1	1	12	12	12	12	4	4	4	4	8
	4	6	6	6	6	8	8	8	8	13	13	13	13	11	11	11
	5	2	2	2	10	10	10	10	1	1	1	1	15	15	15	15
	6	7	7	7	13	13	13	13	11	11	11	11	12	12	12	12
	7	10	10	11	11	11	11	15	15	15	15	6	6	6	6	2
	8	4	4	4	4	7	7	7	7	10	10	10	10	14	14	14
	9	1	9	9	9	9	3	3	3	3	7	7	7	7	13	13
	10	3	3	3	3	2	2	2	2	5	5	5	5	1	1	1
	11	11	15	15	15	15	6	6	6	6	2	2	2	2	5	5
	12	14	12	12	12	12	4	4	4	4	8	8	8	8	10	10
<i>RTG</i>	13	35	35	35	33	33	33	33	36	36	36	36	40	40	40	40
	14	37	37	37	37	32	32	32	32	33	33	33	33	38	38	38
	15	34	34	38	38	38	38	40	40	40	40	37	37	37	37	35
	16	32	32	32	34	34	34	34	38	38	38	38	39	39	39	39
<i>EV</i>	17	33	33	36	36	36	36	39	39	39	39	31	31	31	31	32
	18	36	40	40	40	40	31	31	31	31	32	32	32	32	34	34
<i>RS</i>	19	31	31	31	31	35	35	35	35	34	34	34	34	36	36	36
	20	38	39	39	39	39	37	37	37	37	35	35	35	35	33	33

Fonte: Autoria própria.

4.2 Cenário 2: 23 equipamentos com navio

Os operadores *JR* disponíveis para a operação, no cenário 2, foram enumerados de 1 a 30, os operadores *PL* foram enumerados de 31 a 50 e os operadores *SR* foram enumerados de 51 a 60.

Analogamente, os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 12, os equipamentos *RTG*, enumerados como 13 a 16, o equipamento *EV*, enumerado como 17 ou 17, o equipamento *RS*, enumerado como 18 ou 18, os equipamentos *PT*, enumerados como 19 a 20 e os equipamentos *AUX*, enumerados de 21 a $K = 23$.

Tabela 16 – Parâmetros do Cenário 2

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
2	30	20	10	60	12	4	1	1	2	3	23	21

Fonte: Autoria própria.

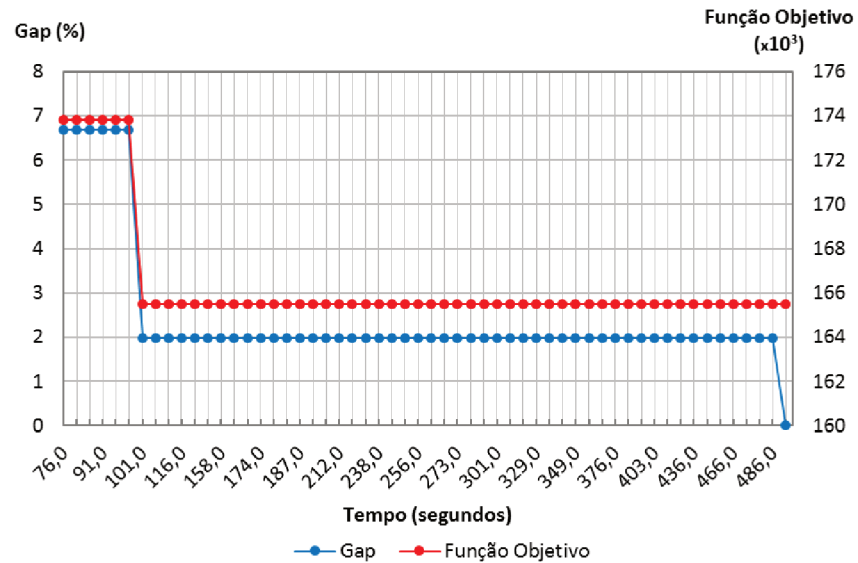
O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 29.040 variáveis binárias, reduzidas a 19.860 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 9.376 iterações em 5,33 segundos para a solução ótima relaxada, e 214.752 iterações em 490,02 segundos para a solução ótima inteira.

A Figura 6 ilustra a relação entre o *gap* e o tempo de processamento, e a relação entre a função objetivo e o tempo de processamento para este cenário. É notável que a solução encontrada para o *gap* menor que 3% foi exatamente a solução final, equivalente a R\$165.480,00 de custo total mensal, portanto, para este cenário, a resposta ótima já havia sido encontrada após 100 segundos de processamento.

Neste cenário, de acordo com a Tabela 17, a solução encontrada pelo modelo reduziu o custo total mensal para a empresa em R\$1.779,00. Foram alocados dois operadores *SR* a mais que na prática para que pudessem ser removidos três operadores *PL*.

Essa redução no número de operadores *SR* acontece pois, na prática, a empresa utiliza uma escala diferenciada para os operadores *SR* devido à importância do desempenho desses operadores. No entanto, o modelo mostra que se a escala dos *SR* for semelhante aos outros operadores, a empresa não perde em produtividade e consegue reduzir seus custos operacionais para que seja possível realocar esse colaborador em outra função quando esta escala for realizada.

Figura 6 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 2.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Resultados do Cenário 2

Resultados	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	0	–
<i>K</i> utilizado	20	20	0
<i>JR</i>	15	15	0
<i>PL</i>	8	5	-3
<i>SR</i>	3	5	2
<i>J</i> utilizado	26	25	-1
Custo Total	R\$ 167.259,00	R\$ 165.480,00	R\$ -1.779,00
Tempo(s)	–	490,03	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 18 ilustra a escala criada para este cenário. Dos 25 operadores escalados, 15 realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada, ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam as jornadas nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 18 – Escala Carrossel para o Cenário 2

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	1	12	12	12	12	14	14	14	14	4	4	4	4	9	9	9
	2	11	11	11	3	3	3	3	9	9	9	9	10	10	10	10
	3	13	10	10	10	10	12	12	12	12	14	14	14	14	3	3
	4	4	4	9	9	9	9	10	10	10	10	7	7	7	7	14
	5	15	1	1	1	1	7	7	7	7	11	11	11	11	4	4
	6	14	14	14	2	2	2	2	15	15	15	15	1	1	1	1
	7	8	8	8	4	4	4	4	13	13	13	13	5	5	5	5
	8	2	2	15	15	15	15	5	5	5	5	12	12	12	12	8
	9	9	5	5	5	5	6	6	6	6	8	8	8	8	2	2
	10	3	3	13	13	13	13	1	1	1	1	6	6	6	6	11
	11	6	6	6	6	11	11	11	11	2	2	2	2	15	15	15
	12	7	7	7	7	8	8	8	8	3	3	3	3	13	13	13
<i>RTG</i>	13	33	52	52	52	52	54	54	54	54	34	34	34	34	53	53
	14	35	35	33	33	33	33	32	32	32	32	31	31	31	31	34
	15	34	34	34	53	53	53	53	33	33	33	33	52	52	52	52
	16	55	32	32	32	32	31	31	31	31	51	51	51	51	35	35
<i>EV</i>	17	31	31	31	31	34	34	34	34	35	35	35	35	33	33	33
<i>RS</i>	18	51	51	51	35	35	35	35	55	55	55	55	32	32	32	32
<i>PT</i>	19	53	53	55	55	55	55	52	52	52	52	54	54	54	54	51
	20	54	54	54	54	51	51	51	51	53	53	53	53	55	55	55

Fonte: Autoria própria.

Outro fato interessante é que como foram escalados apenas dois equipamentos *PT*, os cinco operadores *SR* que foram utilizados nesses equipamentos ficariam ociosos nos períodos em que eles não estivessem operando algum dos *PT*. A partir disso, o modelo indica em que é mais barato alocar os operadores *SR* em outros equipamentos que possuem habilidade, ao invés de deixá-los ociosos até a próxima alocação em algum *PT*, ou ter de alocar mais operadores *PL* para operar os equipamentos *RTG*, *EV* e *RS*. Com isso, todos os operadores *SR* trabalham em equipamentos distintos em uma jornada de 12 horas de trabalho.

Além disso, mesmo os operadores *SR* e *PL* tendo habilidade para operar equipamentos *TT*, o modelo alocou apenas operadores *JR* em equipamentos *TT*, pois há quantidade suficiente destes para realizar a operação durante a jornada de 12 horas.

4.3 Cenário 3: 33 equipamentos sem navio

Os operadores *JR* disponíveis para a operação, no cenário 3, foram enumerados de 1 a 30, os operadores *PL* foram enumerados de 31 a 50 e os operadores *SR* foram enumerados de 51 a 60.

Analogamente, os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 18, os equipamentos *RTG* enumerados como 19 a 26, os equipamentos *EV*, enumerados como 27 a 28, os equipamentos *RS*, enumerados como 29 a 30 e os equipamentos

AUX, enumerados de 31 a 33 não sendo utilizados equipamentos *PT* neste cenário.

Tabela 19 – Parâmetros do Cenário 3

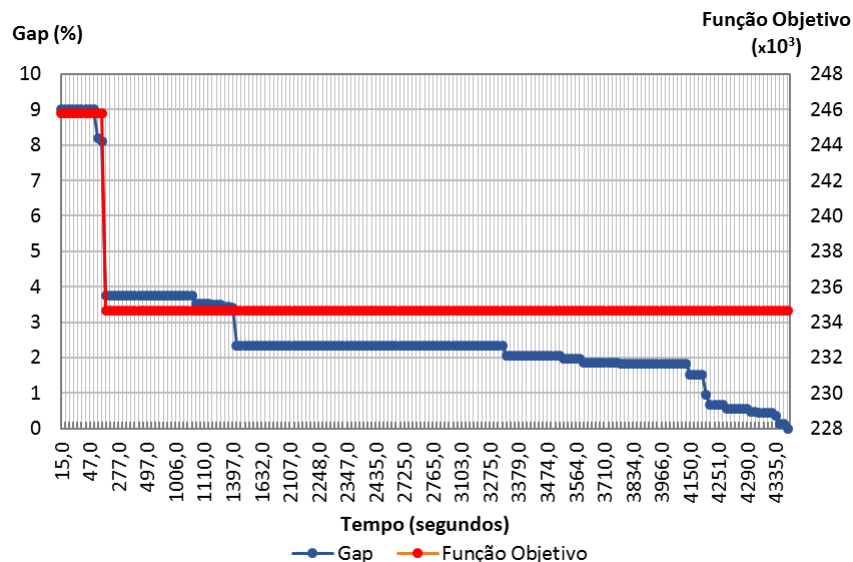
Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
3	30	20	10	60	18	8	2	2	–	3	33	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 41.640 variáveis binárias, reduzidas a 29.220 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 9.760 iterações em 11,58 segundos para a solução ótima relaxada, e 2.907.538 iterações em 4.347,6 segundos, ou uma hora e 12 minutos, para a solução ótima inteira.

A Figura 7 ilustra a relação entre o *gap* e o tempo de processamento, e a relação entre a função objetivo e o tempo de processamento para este cenário. É notável que a solução encontrada para o *gap* menor que 3,74% foi exatamente a solução final, equivalente a R\$234.650,00 de custo total mensal, portanto, para este cenário, a resposta ótima já havia sido encontrada após 225 segundos de processamento.

Figura 7 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

Neste cenário, de acordo com a tabela 20, a solução encontrada pelo modelo aumentou o custo total mensal em R\$8.782,00, pois o modelo alocou dois operadores *JR* a mais do que na prática para que pudesse fechar a escala carrossel dos equipamentos *TT* sem prejudicar a operação nos equipamentos *RTG*, *EV* e *RS*.

Do ponto de vista teórico, o modelo realizou a melhor escala possível para solucionar este problema mediante as restrições estabelecidas. No entanto, do ponto de vista prático, este resultado mostra que não é possível alocar menos de 25 operadores *JR* para operar 18 equipamentos *TT* realizando a escala carrossel de modo que todos os operadores realizem a mesma carga de trabalho durante a jornada de 12 horas.

Como foram alocados três equipamentos *AUX* nesta solução, o modelo sugere que, para garantir que não haja prejuízo, a mão de obra ociosa nos períodos em que não há equipamento disponível seja realocada em dois novos equipamentos nos quais os operadores 9, 16, 23, 24 e 25 tenham habilidade para operar. Por exemplo, na operação de outros equipamentos *TT*, empilhadeira de pequeno porte, ou até mesmo na realização de treinamentos e especialização de mão de obra em equipamentos *RTG*, *EV* e *RS*.

Tabela 20 – Resultados do Cenário 3

Resultados	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	3	–
<i>K</i> utilizado	30	33	3
<i>JR</i>	23	25	2
<i>PL</i>	15	15	0
<i>SR</i>	–	–	–
<i>J</i> utilizado	38	40	2
Custo Total	R\$ 225.868,00	R\$ 234.650,00	R\$ 8.782,00
Tempo(s)	–	4.347,60	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

A tabela 21 ilustra a escala obtida para este cenário. Nela, 24 dos 40 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 21 – Escala Carrossel para o Cenário 3

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TT	1	19	3	3	3	3	22	22	22	22	6	6	6	6	13	13
	2	10	10	10	10	8	8	8	8	13	13	13	13	11	11	11
	3	22	22	22	22	21	21	21	21	5	5	5	5	20	20	20
	4	2	2	2	14	14	14	14	11	11	11	11	15	15	15	15
	5	4	15	15	15	15	17	17	17	17	21	21	21	21	12	12
	6	7	7	7	7	2	2	2	2	14	14	14	14	19	19	19
	7	11	16	16	16	16	10	10	10	10	8	8	8	8	5	5
	8	13	13	20	20	20	20	3	3	3	3	10	10	10	10	6
	9	17	17	17	17	6	6	6	6	12	12	12	12	4	4	4
	10	20	1	1	1	1	7	7	7	7	2	2	2	2	14	14
	11	16	16	16	16	23	23	23	23	25	25	25	25	24	24	24
	12	8	8	8	13	13	13	13	20	20	20	20	1	1	1	1
	13	6	6	6	5	5	5	5	19	19	19	19	16	16	16	16
	14	12	12	11	11	11	11	1	1	1	1	17	17	17	17	2
	15	21	21	21	12	12	12	12	4	4	4	4	3	3	3	3
	16	23	23	23	25	25	25	25	24	24	24	24	9	9	9	9
	17	14	14	19	19	19	19	16	16	16	16	7	7	7	7	21
	18	5	5	4	4	4	4	15	15	15	15	22	22	22	22	8
RTG	19	38	34	34	34	34	42	42	42	42	33	33	33	33	31	31
	20	39	39	39	31	31	31	31	37	37	37	37	34	34	34	34
	21	36	36	36	36	39	39	39	39	45	45	45	45	37	37	37
	22	44	44	38	38	38	38	34	34	34	34	35	35	35	35	33
	23	31	31	32	32	32	32	40	40	40	40	42	42	42	42	41
	24	41	41	41	44	44	44	44	38	38	38	38	43	43	43	43
	25	32	43	43	43	43	35	35	35	35	41	41	41	41	44	44
	26	45	45	37	37	37	37	43	43	43	43	36	36	36	36	39
EV	27	35	35	35	35	33	33	33	33	44	44	44	44	38	38	38
	28	37	40	40	40	40	36	36	36	36	39	39	39	39	45	45
RS	29	42	42	42	42	41	41	41	41	31	31	31	31	32	32	32
	30	33	33	33	45	45	45	45	32	32	32	32	40	40	40	40
AUX	31	24	9	9	9	9	–	9	9	9	9	16	16	16	16	–
	32	25	25	–	–	–	16	16	16	16	23	23	23	23	–	23
	33	–	–	24	24	24	24	–	–	–	–	–	–	–	25	25

Fonte: Autoria própria.

Outro fato interessante é que mesmo os operadores PL tendo habilidade para operar equipamentos TT , o modelo apresenta em um cenário em que é mais vantajoso alocar os operadores PL somente nos RTG , EV e RS ao invés de alocá-los nos equipamentos TT .

4.4 Cenário 4: 33 equipamentos com navio

O Cenário 4 é semelhante ao Cenário 3, tendo o mesmo número de operadores a disposição, quantidade total de equipamentos a serem alocados e quantidade de variáveis binárias.

A diferença entre os cenários é a substituição de um equipamento *RTG*, um *EV* e um *RS* por três equipamentos *PT*. Portanto, os equipamentos *TT* foram enumerados de 1 a 18, os equipamentos *RTG*, enumerados de 19 a 25, o equipamento *EV*, enumerado como 26, o equipamento *RS*, enumerado como 27, os equipamentos *PT*, enumerados de 28 a 30 e os equipamentos *AUX* enumerados de 31 a 33.

A enumeração dos operadores é idêntica ao cenário 3 sendo operadores *JR* de 1 a 30, os operadores *PL* de 31 a 50 e os operadores *SR* de 51 a 60.

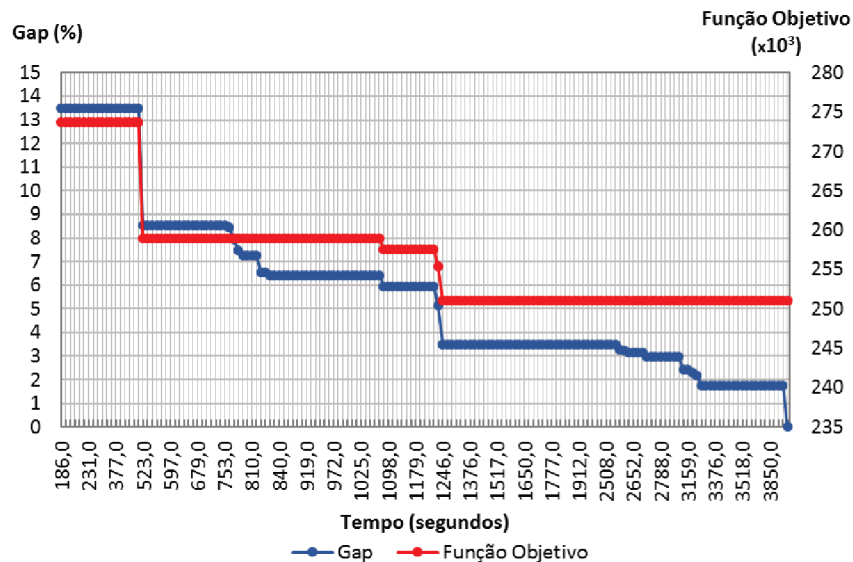
Tabela 22 – Parâmetros do Cenário 4

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
4	30	20	10	60	18	7	1	1	3	3	33	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 41.640 variáveis binárias, reduzidas a 28.140 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 9.961 iterações em 11,63 segundos para a solução ótima relaxada, e 3.076.430 iterações em 3.974,7 segundos, ou uma hora e seis minutos, para a solução ótima inteira.

Figura 8 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 4.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 ilustra relações do valor da função objetivo e *gap* quanto ao tempo de processamento. Diferentemente dos cenários anteriores, o modelo encontrou mais soluções viáveis até a solução ótima, com custo total mensal de R\$251.015,00, após 1.246 segundos de processamento. Além disso, quando o *gap* chegou a 3,5% a solução não sofreu alteração até chegar no valor ótimo, tal que a resposta ótima já havia sido encontrada após 1.246 segundos de processamento.

Neste cenário, de acordo com a Tabela 23, a solução encontrada pelo modelo reduziu o custo total mensal em R\$7.868,00 em comparação ao realizado na prática, pois o modelo substituiu dois operadores *PL* por dois operadores *JR*. Essa substituição foi possível devido à quantidade de equipamentos *PT* utilizados.

Como não há equipamentos *PT* disponíveis para todos os operadores *SR* trabalharem durante a jornada de 12 horas, o modelo alocou os operadores 51, 52, 53 e 54 em equipamentos *RTG* ao passo que sete operadores *JR* (3, 8, 11, 13, 15, 18 e 24) foram alocados em três equipamentos *AUX*.

Tabela 23 – Resultados do Cenário 4

Resultado	Atual	Modelo	Diferença(Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	3	–
<i>K</i> utilizado	30	33	3
<i>JR</i>	23	25	2
<i>PL</i>	12	10	-2
<i>SR</i>	5	5	0
<i>J</i> utilizado	40	40	0
Custo Total	R\$ 258.883,00	R\$ 251.015,00	R\$-7.868,00
Tempo(s)	–	3.974,73	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

Caso a empresa tenha interesse em otimizar a mão de obra alocada em equipamentos *AUX* é possível alocá-los em outros dois equipamentos *TT*, empilhadeira de pequeno porte, ou até mesmo em treinamentos de capacitação e especialização de mão de obra em equipamentos *RTG*, *EV* e *RS*.

Ao adicionar dois equipamentos *TT* neste cenário é possível chegar na melhor combinação de equipamentos, pois, quando comparado com a prática, é possível remanejar dois operadores *PL* desta escala em outra atividade, reduzindo o custo total mensal em R\$ 16.650,00.

O expressivo resultado de redução de custo caso haja essa adição de dois equipamentos é possível pois, na prática, a empresa utiliza uma escala diferenciada para os operadores *SR* devido à importância da performance desses operadores. No entanto, o modelo mostra que, se a escala dos operadores *SR* for semelhante aos operadores *JR* e *PL*, a empresa não perde em produtividade e consegue reduzir custos operacionais para que se possa realocar esse colaborador em outra função quando esta escala for realizada.

A Tabela 24 ilustra a escala criada para este cenário. Nela, 24 dos 40 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 24 – Escala Carrossel para o Cenário 4

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TT	1	3	3	3	3	16	16	16	16	2	2	2	2	6	6	6
	2	16	16	16	22	22	22	22	8	8	8	8	25	25	25	25
	3	17	17	17	24	24	24	24	14	14	14	14	7	7	7	7
	4	24	24	13	13	13	13	1	1	1	1	10	10	10	10	9
	5	8	25	25	25	25	3	3	3	3	16	16	16	16	2	2
	6	2	2	14	14	14	14	21	21	21	21	5	5	5	5	23
	7	5	5	5	5	9	9	9	9	15	15	15	15	8	8	8
	8	14	7	7	7	7	5	5	5	5	16	16	16	16	4	4
	9	16	16	16	15	15	15	15	13	13	13	13	21	21	21	21
	10	9	9	9	4	4	4	4	19	19	19	19	1	1	1	1
	11	10	10	10	10	17	17	17	17	4	4	4	4	14	14	14
	12	6	12	12	12	12	10	10	10	10	9	9	9	9	15	15
	13	19	1	1	1	1	20	20	20	20	23	23	23	23	22	22
	14	22	22	19	19	19	19	12	12	12	12	20	20	20	20	17
	15	13	21	21	21	21	11	11	11	11	17	17	17	17	24	24
	16	4	4	6	6	6	6	7	7	7	7	11	11	11	11	16
	17	20	20	20	20	23	23	23	23	22	22	22	22	19	19	19
	18	23	23	23	2	2	2	2	6	6	6	6	12	12	12	12
RTG	19	39	39	52	52	52	52	53	53	53	53	35	35	35	35	37
	20	31	34	34	34	34	35	35	35	35	37	37	37	37	36	36
	21	33	33	33	33	37	37	37	37	36	36	36	36	40	40	40
	22	35	35	35	35	32	32	32	32	39	39	39	39	31	31	31
	23	54	54	31	31	31	31	38	38	38	38	51	51	51	51	32
	24	36	36	40	40	40	40	34	34	34	34	33	33	33	33	55
	25	37	37	37	39	39	39	39	31	31	31	31	38	38	38	38
EV	26	40	38	38	38	38	33	33	33	33	32	32	32	32	39	39
RS	27	32	32	32	36	36	36	36	40	40	40	40	34	34	34	34
PT	28	55	55	55	54	54	54	54	52	52	52	52	53	53	53	53
	29	51	51	51	51	55	55	55	55	54	54	54	54	52	52	52
	30	52	53	53	53	53	51	51	51	51	55	55	55	55	54	54
AUX	31	–	–	8	8	8	8	25	25	25	25	3	3	3	3	–
	32	11	11	11	11	–	–	–	–	–	–	–	–	13	13	13
	33	15	15	–	–	16	16	16	16	24	24	24	24	–	–	16

Fonte: Autoria própria.

Outro fato interessante é que mesmo os operadores PL tendo habilidade para operar equipamentos TT , o modelo apresenta em um cenário em que é mais vantajoso alocar os operadores PL somente nos RTG , EV e RS ao invés de alocá-los nos equipamentos TT .

4.5 Cenário 5: 43 equipamentos sem navio

Os operadores *JR* disponíveis para a operação foram enumerados de 1 a 30, os operadores *PL* foram enumerados de 31 a 50 e os operadores *SR* foram enumerados de 51 a 60.

Analogamente, os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 24, os equipamentos *RTG*, enumerados como 25 a 36, os equipamentos *EV*, enumerados como 37 a 38, os equipamentos *RS*, enumerados como 39 a 40 e os equipamentos *AUX* enumerados de 41 a 43. Não foram utilizados equipamentos *PT* para esse cenário.

Tabela 25 – Parâmetros do Cenário 5

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
5	30	20	10	60	24	12	2	2	–	3	43	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 54.240 variáveis binárias, reduzidas a 37.860 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 13.955 iterações em 15,31 segundos para a solução ótima relaxada, e 24.723 iterações em 163,03 segundos para a solução ótima inteira.

Neste cenário, conforme mostra a Tabela 26, a solução encontrada pelo modelo foi exatamente igual à escala aplicada na prática pela empresa, equivalente a R\$298.230,00 de custo total mensal com resolução pelo Gurobi que exigiu apenas 163,03 segundos de processamento computacional.

Tabela 26 – Resultados do Cenário 5

Resultado	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	–	–
<i>K</i> utilizado	40	40	0
<i>JR</i>	30	30	0
<i>PL</i>	20	20	0
<i>SR</i>	–	–	–
<i>J</i> utilizado	50	50	0
Custo Total	R\$ 298.230,00	R\$ 298.230,00	0
Tempo(s)	–	163,03	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

Assim como o Cenário 1, este cenário também pode ser interpretado como uma extensão do cenário base com quatro TT , pois a solução inteira é igual à solução relaxada. Portanto, o único ganho para este cenário é o tempo utilizado pelo analista para construir a escala do dia seguinte.

A Tabela 27 ilustra a escala criada para este cenário. Nela, 30 dos 50 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 27 – Escala Carrossel para o Cenário 5

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TT	1	5	5	5	2	2	2	2	19	19	19	19	22	22	22	22
	2	4	4	4	4	29	29	29	29	7	7	7	7	16	16	16
	3	6	30	30	30	30	13	13	13	13	5	5	5	5	3	3
	4	10	28	28	28	28	15	15	15	15	20	20	20	20	21	21
	5	24	24	24	24	20	20	20	20	1	1	1	1	19	19	19
	6	11	8	8	8	8	24	24	24	24	29	29	29	29	2	2
	7	17	17	10	10	10	10	26	26	26	26	4	4	4	4	23
	8	21	21	6	6	6	6	9	9	9	9	24	24	24	24	29
	9	20	20	20	1	1	1	1	16	16	16	16	30	30	30	30
	10	12	12	12	12	5	5	5	5	21	21	21	21	6	6	6
	11	7	7	14	14	14	14	30	30	30	30	13	13	13	13	5
	12	2	2	11	11	11	11	22	22	22	22	16	16	16	16	27
	13	29	29	29	7	7	7	7	11	11	11	11	9	9	9	9
	14	1	1	16	16	16	16	28	28	28	28	12	12	12	12	25
	15	13	13	13	13	25	25	25	25	3	3	3	3	10	10	10
	16	23	23	23	3	3	3	3	14	14	14	14	8	8	8	8
	17	14	26	26	26	26	4	4	4	4	25	25	25	25	7	7
	18	3	3	19	19	19	19	8	8	8	8	15	15	15	15	20
	19	19	22	22	22	22	12	12	12	12	27	27	27	27	1	1
	20	27	27	27	21	21	21	21	6	6	6	6	28	28	28	28
	21	15	15	15	15	23	23	23	23	17	17	17	17	11	11	11
	22	25	25	25	17	17	17	17	10	10	10	10	26	26	26	26
	23	16	9	9	9	9	16	16	16	16	23	23	23	23	17	17
	24	16	16	16	16	27	27	27	27	2	2	2	2	14	14	14
RTG	25	37	37	37	31	31	31	31	34	34	34	34	40	40	40	40
	26	44	47	47	47	47	38	38	38	38	39	39	39	39	50	50
	27	33	33	33	33	45	45	45	45	46	46	46	46	34	34	34
	28	49	32	32	32	32	35	35	35	35	45	45	45	45	46	46
	29	31	31	44	44	44	44	48	48	48	48	38	38	38	38	36
	30	45	45	45	50	50	50	50	42	42	42	42	48	48	48	48
	31	43	43	42	42	42	42	47	47	47	47	35	35	35	35	39
	32	39	39	39	43	43	43	43	44	44	44	44	47	47	47	47
	33	38	38	38	38	36	36	36	36	31	31	31	31	44	44	44
	34	36	36	36	46	46	46	46	49	49	49	49	32	32	32	32
	35	42	40	40	40	40	33	33	33	33	36	36	36	36	31	31
	36	50	50	34	34	34	34	32	32	32	32	41	41	41	41	37
EV	37	35	35	35	35	37	37	37	37	50	50	50	50	49	49	49
	38	34	48	48	48	48	41	41	41	41	37	37	37	37	43	43
RS	39	41	41	41	41	39	39	39	39	43	43	43	43	42	42	42
	40	46	46	49	49	49	49	49	40	40	40	33	33	33	33	45

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, todos os operadores *JR* e *PL* disponíveis foram utilizados, restando apenas os operadores *SR*, tal que pelo custo de alocação mais elevado, é mais adequado não alocá-los em nenhum equipamento. Desse modo, caso seja necessário utilizar algum desses operadores basta substituí-los por qualquer outro, visto que os operadores *SR* têm habilidade suficiente para operar qualquer equipamento.

Outro fato interessante é que, mesmo os operadores *PL* tendo habilidade para operar equipamentos *TT*, é mais vantajoso alocar os operadores *PL* somente nos *RTG*, *EV* e *RS* ao invés de alocá-los nos equipamentos *TT*. Isso mostra o quanto próximo da realidade é a solução gerada pelo modelo matemático.

4.6 Cenário 6: 43 equipamentos com navio

Os operadores *JR* disponíveis para a operação, no cenário 6, foram enumerados de 1 a 30, os operadores *PL* foram enumerados de 31 a 50 e os operadores *SR* foram enumerados de 51 a 60.

Analogamente, os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 24, os equipamentos *RTG*, enumerados como 25 a 34, o equipamento *EV*, enumerado como 35, o equipamento *RS*, enumerado como 36, os equipamentos *PT*, enumerados como 37 a 40 e os equipamentos *AUX*, enumerados de 41 a 43.

Tabela 28 – Parâmetros do Cenário 6

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
6	30	20	10	60	24	10	1	1	4	3	43	21

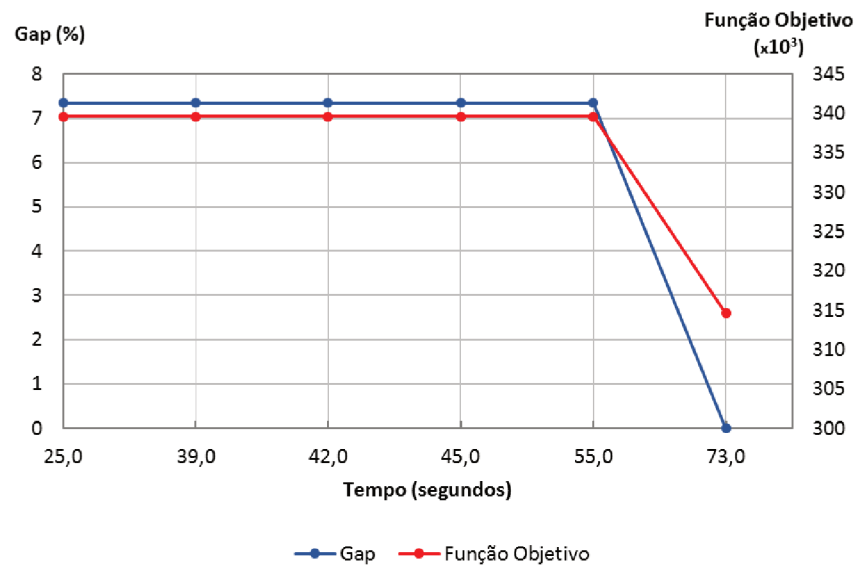
Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 54.240 variáveis binárias, reduzidas a 36.420 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 12.025 iterações em 11,17 segundos para a solução ótima relaxada, e 93.063 iterações em 73,50 segundos para a solução ótima inteira. A solução relaxada identificada não é a ótima, porém foi possível identificá-la na segunda etapa de resolução do modelo matemático inteiro.

A Figura 9 ilustra a relação entre o *gap* e o tempo de processamento, e a relação entre a função objetivo e o tempo de processamento para este cenário. Neste cenário, de acordo com a Tabela 29, a solução encontrada indicou redução do custo total em R\$11.598,00 pois foi alocado 1 operador *SR* a menos em relação à prática.

O principal motivo pela redução no número de operadores *SR* é a mudança na proposta de escala deles durante a jornada de 12 horas. O modelo mostra que, se a escala dos operadores *SR* for semelhante aos outros operadores, a empresa não perde em produtividade e consegue reduzir custos operacionais para que se possa realocar esse colaborador em outra função quando esta escala for realizada.

Figura 9 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 6.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 29 – Resultados do Cenário 6

Resultado	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	–	–
<i>K</i> utilizado	40	40	0
<i>JR</i>	30	30	0
<i>PL</i>	15	15	0
<i>SR</i>	6	5	-1
<i>J</i> utilizado	51	50	-1
Custo Total	R\$ 326.193,00	R\$ 314.595,00	R\$ -11.598,00
Tempo(s)	–	735,03	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 30 ilustra a escala criada para este cenário. Nela, 30 dos 50 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém eles iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

Tabela 30 – Escala Carrossel para o Cenário 6

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	1	28	28	28	28	4	4	4	4	8	8	8	8	16	16	16
	2	16	16	16	16	19	19	19	19	6	6	6	6	15	15	15
	3	11	11	11	8	8	8	8	25	25	25	25	30	30	30	30
	4	16	27	27	27	27	9	9	9	9	4	4	4	4	13	13
	5	15	30	30	30	30	5	5	5	5	19	19	19	19	8	8
	6	29	29	29	29	2	2	2	2	23	23	23	23	17	17	17
	7	22	21	21	21	21	7	7	7	7	3	3	3	3	24	24
	8	3	3	3	14	14	14	14	17	17	17	17	20	20	20	20
	9	4	4	4	13	13	13	13	22	22	22	22	27	27	27	27
	10	13	13	22	22	22	22	12	12	12	12	9	9	9	9	2
	11	24	24	16	16	16	16	21	21	21	21	7	7	7	7	10
	12	17	26	26	26	26	16	16	16	16	10	10	10	10	6	6
	13	5	5	5	5	11	11	11	11	13	13	13	13	25	25	25
	14	8	8	25	25	25	25	27	27	27	27	5	5	5	5	3
	15	1	20	20	20	20	29	29	29	29	2	2	2	2	14	14
	16	2	2	2	23	23	23	23	15	15	15	15	21	21	21	21
	17	25	12	12	12	12	28	28	28	28	11	11	11	11	23	23
	18	7	7	7	7	3	3	3	3	24	24	24	24	22	22	22
	19	6	6	15	15	15	15	30	30	30	30	16	16	16	16	4
	20	9	9	9	9	10	10	10	10	14	14	14	14	1	1	1
	21	23	23	17	17	17	17	26	26	26	26	28	28	28	28	19
	22	14	14	1	1	1	1	20	20	20	20	29	29	29	29	11
	23	10	10	10	24	24	24	24	16	16	16	16	26	26	26	26
	24	19	19	19	6	6	6	6	1	1	1	1	12	12	12	12
<i>RTG</i>	25	36	36	43	43	43	43	35	35	35	35	38	38	38	38	37
	26	34	34	32	32	32	32	42	42	42	42	39	39	39	39	40
	27	40	40	40	36	36	36	36	32	32	32	32	42	42	42	42
	28	31	42	42	42	42	38	38	38	38	37	37	37	37	34	34
	29	39	39	39	39	40	40	40	40	33	33	33	33	31	31	31
	30	32	41	41	41	41	39	39	39	39	40	40	40	40	33	33
	31	44	44	44	33	33	33	33	33	43	43	43	43	35	35	35
	32	45	45	45	45	37	37	37	37	36	36	36	36	32	32	32
	33	43	35	35	35	35	45	45	45	45	44	44	44	44	36	36
	34	38	38	38	38	44	44	44	44	34	34	34	34	43	43	43
<i>EV</i>	35	37	37	37	34	34	34	34	31	31	31	31	41	41	41	41
<i>RS</i>	36	33	33	31	31	31	31	41	41	41	41	45	45	45	45	44
<i>RTG</i>	37	55	55	55	55	54	54	54	54	52	52	52	52	53	53	53
	38	53	51	51	51	51	55	55	55	55	54	54	54	54	52	52
	39	54	54	54	52	52	52	52	53	53	53	53	51	51	51	51
	40	52	52	53	53	53	53	51	51	51	51	55	55	55	55	54

Fonte: Autoria própria.

Neste cenário, como a quantidade de equipamentos de cada tipo é múltipla de quatro, todos os cinco operadores *SR* foram utilizados nos *PT*, todos os 15 operadores *PL* foram alocados em *RTG*, *EV* e *RS*, pois, além dos *SR*, aqueles são os únicos que têm habilidade para operar estes equipamentos, e os 30 operadores *JR* foram todos alocados em equipamentos *TT*. Portanto, não houve necessidade de utilizar um operador mais caro para realizar uma função que pode ser exercida por um operador mais barato para a empresa.

4.7 Cenário 7: 63 equipamentos sem navio

Os métodos propostos nos cenários anteriores convergiram para uma solução ótima global do modelo matemático. Entretanto, existem algumas limitações que impedem essa convergência para cenários de grande escala em tempo de processamento compatível com as necessidades da empresa.

Este cenário foi proposto para caracterizar uma situação crítica na qual é possível visualizar as limitações da modelagem em relação à quantidade de variáveis, quantidade de cada tipo de equipamento e o tempo de execução.

Neste cenário, simulou-se uma operação futura em que o número total de equipamentos é proporcional ao cenário base, porém com quantidades diferentes de tipos de equipamentos. Assim, conforme a Tabela 31, optou-se por utilizar 63 equipamentos, não sendo utilizados equipamentos *PT*, tal que o total de equipamentos *TT* é um número ímpar, bem como a soma de equipamentos *RTG*, *EV* e *RS*.

Os equipamentos *TT* requisitados foram enumerados de 1 a 39, os equipamentos *RTG* enumerados como 40 a 56, os equipamentos *EV* enumerados de 57 a 58, os equipamentos *RS* enumerados de 59 a 60 e os equipamentos *AUX* enumerados de 61 a 63.

Analogamente, os operadores *JR* disponíveis para a operação, foram enumerados de 1 a 60, os operadores *PL* foram enumerados de 61 a 110 e os operadores *SR* foram enumerados de 111 a 122.

Tabela 31 – Parâmetros do Cenário 7

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
7	60	50	12	122	39	17	2	2	–	3	63	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 161.528 variáveis binárias, reduzidas a 115.790 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 33.904 iterações em 65,14 segundos para a solução ótima relaxada, entretanto, após 71,8 horas de execução não foi possível chegar em uma solução ótima global, pois o *gap* não foi menor que 1,77%.

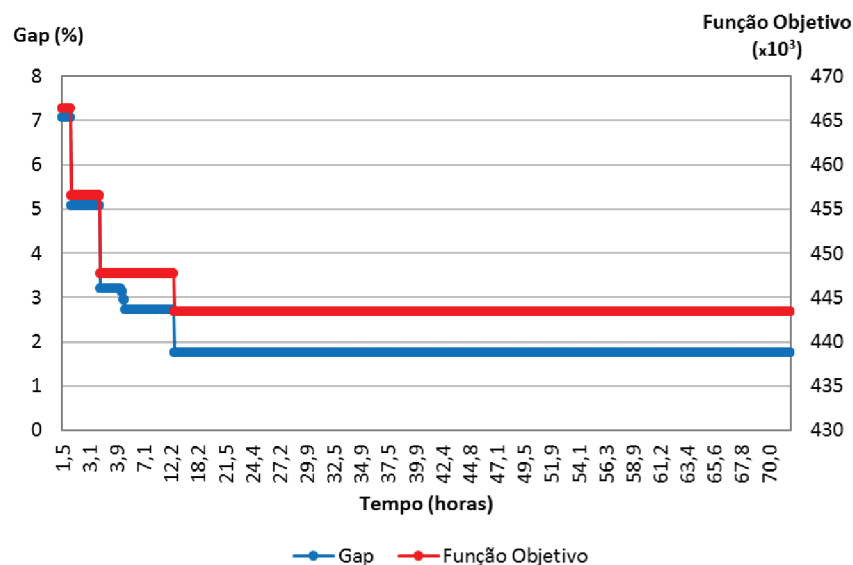
A partir desse instante optou-se pela interrupção da execução do modelo, visto que a solução e o *gap* permaneceram inalterados durante 59 horas e a discrepância entre o tempo de execução necessário para se chegar na solução ótima global neste cenário e nos cenários anteriores é demasiadamente grande.

A Figura 10 ilustra a relação do *gap* e da função objetivo quanto ao tempo de processamento, que neste cenário teve solução viável de R\$ 443.411,00 de custo total mensal com *gap* de 1,77% após 4.113.466 iterações e 12,8 horas de execução, porém permaneceu inalterada durante, aproximadamente, 59 horas.

Como o modelo foi interrompido após 71,8 horas de execução, não foi possível gerar uma escala de alocação dos operadores para este cenário. No entanto, para tornar possível a visualização desta alocação na prática, foi realizada uma segunda tentativa, porém com um tempo limite de execução de 13 horas, admitindo-se que a solução equivalente a R\$ 443.411,00 de custo total mensal com o *gap* de 1,77% é a melhor possível de ser identificada para este cenário, sem custo extra.

A solução encontrada pelo modelo neste cenário pode, eventualmente, ser considerada ótima pois a quantidade de operadores *JR* e *PL* alocados neste cenário é múltipla do cenário base. Ou seja, como o número total de 60 equipamentos solicitados neste cenário é proporcional a quatro, espera-se que o número de operadores necessários, independentemente de habilidade, seja proporcional a cinco. Portanto, se quatro equipamentos necessitam de cinco operadores, 60 equipamentos necessitam de 75 operadores.

Figura 10 – Relação entre *gap* de otimalidade, custo total e tempo de processamento para alocação no Cenário 7.



Fonte: Autoria própria.

Todavia, ao analisar, separadamente, os 21 equipamentos solicitados dos quais apenas operadores *PL* e *SR* têm habilidade suficiente para operar, foram alocados 29 operadores *PL*. Desses 29, quatro ficariam ociosos em alguns períodos caso não houvesse equipamentos *TT* disponíveis.

A mesma análise separadamente ocorre para os equipamentos *TT*. Quando foram solicitados 39 equipamentos, o modelo alocou 46 operadores *JR* para realizar essas funções. Desses 46 colaboradores, um não conseguiria operar três equipamentos *TT* ao mesmo tempo durante as 12 horas, ou seja, três equipamentos *TT* ficariam ociosos, resultando em uma solução inviável para o problema.

No entanto, ao combinar os equipamentos (*TT*, *RTG*, *EV* e *RS*), é possível alocar a quantidade de operadores *PL* ociosa nos equipamentos *TT* ociosos sem violar as restrições do modelo. Desse modo, é possível que quatro operadores *PL* e um operador *JR* operem os três equipamentos *TT* pendentes, solucionando o problema deste cenário.

Tabela 32 – Resultados do Cenário 7

Resultado	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	–	–
<i>K</i> utilizado	60	60	0
<i>JR</i>	49	46	-3
<i>PL</i>	27	29	2
<i>SR</i>	–	–	–
<i>J</i> utilizado	76	75	-1
Custo Total	R\$ 439.934,00	R\$ 443.411,00	R\$ 3.477,00
Tempo(s)	–	46.808,02	–
Gap (%)	–	1,77	–

Fonte: Autoria própria.

Em contrapartida, como a solução encontrada com o *gap* de 1,77% aloca, parcialmente, oito operadores *PL* em sete equipamentos *TT*, conforme destacado em amarelo na Tabela 33. Assume-se que para chegar na solução ótima global, o modelo ajustaria a alocação para chegar em quatro operadores *PL* em três equipamentos *TT* apenas.

Além disso, 45 dos 75 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam três períodos como todos os outros, porém eles iniciam nos equipamentos propostos quatro vezes ao invés de três por jornada de 12 horas.

De acordo com a Tabela 32, mesmo com a redução de um operador, o custo total mensal aumentou em R\$ 3.477,00, pois o modelo substituiu três operadores *JR* por dois operadores *PL*.

Nesse caso, portanto, para não gerar o custo extra é necessário avaliar o quadro de colaboradores esperado pela companhia quando for possível realizar um cenário desta proporção. Caso a quantidade de operadores *PL* seja menor que 29, talvez seja interessante utilizar desta substituição como uma oportunidade de treinamento dos operadores *JR*, ao invés de contratar mais dois *PL*, ou a segunda opção seria promover aqueles que já estão aptos a operar equipamentos *RTG*, *EV* e *RS* e não contratar operadores *PL*. Com isso, não haveria custos extras para realizar a escala carrossel.

Tabela 33 – Escala Carrossel para o Cenário 7

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	1	83	89	89	89	89	25	25	25	25	24	24	24	24	19	19
	2	15	15	41	41	41	41	13	13	13	13	31	31	31	31	44
	3	41	11	11	11	11	21	21	21	21	38	38	38	38	15	15
	4	42	42	42	35	35	35	35	41	41	41	41	17	17	17	17
	5	20	43	43	43	43	27	27	27	27	28	28	28	28	82	82
	6	23	23	23	23	34	34	34	34	2	2	2	2	8	8	8
	7	22	17	17	17	17	1	1	1	1	34	34	34	34	40	40
	8	24	24	24	15	15	15	15	6	6	6	6	29	29	29	29
	9	38	38	38	19	19	19	19	4	4	4	4	11	11	11	11
	10	25	25	25	25	37	37	37	37	40	40	40	40	5	5	5
	11	32	32	4	4	4	4	7	7	7	7	12	12	12	12	42
	12	33	33	33	10	10	10	10	36	36	36	36	7	7	7	7
	13	34	34	34	40	40	40	40	20	20	20	20	45	45	45	45
	14	12	12	12	12	44	44	44	44	64	64	64	64	20	20	20
	15	6	45	45	45	45	9	9	9	9	37	37	37	37	26	26
	16	5	29	29	29	29	3	3	3	3	16	16	16	16	35	35
	17	31	31	31	31	74	74	74	74	10	10	10	10	14	14	14
	18	4	7	7	7	7	39	39	39	39	42	42	42	42	32	32
	19	44	44	44	46	46	46	46	5	5	5	5	16	16	16	16
	20	9	9	9	9	38	38	38	38	19	19	19	19	4	4	4
	21	19	19	8	8	8	8	16	16	16	16	9	9	9	9	16
	22	21	21	21	21	16	16	16	16	26	26	26	26	36	36	36
	23	27	27	27	27	42	42	42	42	35	35	35	35	41	41	41
	24	75	75	14	14	14	14	43	43	43	43	39	39	39	39	37
	25	37	37	37	2	2	2	2	22	22	22	22	30	30	30	30
	26	16	16	16	32	32	32	32	14	14	14	14	13	13	13	13
	27	1	1	1	1	33	33	33	33	32	32	32	32	22	22	22
	28	14	13	13	13	13	12	12	12	12	77	77	77	77	2	2
	29	36	30	30	30	30	23	23	23	23	33	33	33	33	10	10
	30	3	3	3	3	28	28	28	28	15	15	15	15	76	76	76
	31	8	16	16	16	16	31	31	31	44	44	44	44	44	46	46
	32	40	40	62	62	62	62	80	80	80	80	21	21	21	21	38
	33	46	46	6	6	6	6	17	17	17	17	3	3	3	3	34
	34	26	26	20	20	20	20	45	45	45	45	1	1	1	1	33
	35	35	35	22	22	22	22	30	30	30	30	27	27	27	27	28
	36	28	28	28	26	26	26	26	8	8	8	8	43	43	43	43
	37	39	39	39	39	24	24	24	24	46	46	46	46	6	6	6
	38	10	10	36	36	36	36	11	11	11	11	25	25	25	25	74
	39	2	2	5	5	5	5	29	29	29	29	23	23	23	23	24
<i>RTG</i>	40	84	65	65	65	65	85	85	85	85	78	78	78	78	64	64
	41	88	88	88	88	81	81	81	81	68	68	68	68	84	84	84
	42	86	86	73	73	73	73	73	71	71	71	71	88	88	88	70
	43	69	69	69	69	70	70	70	70	75	75	75	75	83	83	83
	44	61	61	61	61	78	78	78	78	79	79	79	79	73	73	73
	45	81	81	81	75	75	75	75	73	73	73	73	72	72	72	72
	46	78	78	78	86	86	86	86	76	76	76	76	65	65	65	65
	47	67	80	80	80	80	80	69	69	69	69	74	74	74	79	79
	48	66	66	66	66	77	77	77	77	86	86	86	86	67	67	67
	49	64	64	84	84	84	84	72	72	72	72	85	85	85	85	63
	50	85	85	85	85	63	63	63	63	82	82	82	82	62	62	62
	51	70	70	70	64	64	64	64	62	62	62	62	87	87	87	87
	52	76	72	72	72	72	66	66	66	66	81	81	81	81	86	86
	53	79	79	76	76	76	76	65	65	65	65	69	69	69	69	81
	54	74	74	74	68	68	68	68	84	84	84	84	89	89	89	89
	55	82	82	67	67	67	67	87	87	87	87	87	66	66	66	78
	56	68	68	83	83	83	83	89	89	89	89	89	61	61	61	77
<i>EV</i>	57	77	77	77	79	79	79	79	67	67	67	67	80	80	80	80
	58	73	87	87	87	87	88	88	88	88	70	70	70	70	75	75
<i>RS</i>	59	63	63	63	82	82	82	82	83	83	83	83	71	71	71	71
	60	62	71	71	71	71	61	61	61	61	63	63	63	63	68	68

Fonte: Autoria própria.

4.8 Cenário 8: 123 equipamentos com navio

Assim como no Cenário 7, este cenário tem como objetivo simular uma operação futura em que o número total de equipamentos seja suficiente para operar, simultaneamente, três navios de grande porte com quatro equipamentos *PT* em cada um deles.

Apesar de ter uma grande quantidade de equipamentos, o modelo que representa este cenário é relativamente simples de ser resolvido do ponto de vista computacional pois a quantidade de equipamentos proposta, 120 (desconsiderando *AUX*, pois ele não é obrigatório), é proporcional ao cenário base não somente para o número total de equipamentos, mas também para todos os tipos de equipamentos *TT*, *RTG*, *EV*, *RS* e *PT*.

Analogamente aos cenários 1 e 5, este cenário também possui a solução global inteira igual à solução inicial relaxada, ou seja, se o modelo fosse contínuo, essa também seria a melhor resposta.

Os equipamentos requisitados foram enumerados de 1 a 72, os equipamentos *RTG*, enumerados como 73 a 101, os equipamentos *EV* enumerados de 102 a 104, os equipamentos *RS* enumerados de 105 a 108, os equipamentos *PT*, enumerados de 109 a 120, e os equipamentos *AUX*, enumerados de 121 a 123.

Da mesma forma, os operadores *JR* disponíveis para a operação foram enumerados de 1 a 100, os operadores *PL* foram enumerados de 101 a 160 e os operadores *SR* foram enumerados de 161 a 180.

Tabela 34 – Parâmetros do Cenário 8

Cenário	<i>JR</i>	<i>PL</i>	<i>SR</i>	<i>J</i>	<i>TT</i>	<i>RTG</i>	<i>EV</i>	<i>RS</i>	<i>PT</i>	<i>AUX</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
8	100	60	20	180	72	29	3	4	12	3	123	21

Fonte: Autoria própria.

O modelo resolvido nesse cenário possui, inicialmente, 465.120 variáveis binárias, reduzidas a 299.340 após a pré-solução do Gurobi. Foram necessárias 66.480 iterações em 572,83 segundos para a solução ótima relaxada, e 962.578 iterações em 8.318,25 segundos (aproximadamente dois horas e 18 minutos) para a solução ótima inteira.

Para este cenário, a solução ótima inteira é igual a solução ótima relaxada, equivalente a R\$943.785,00 de custo total mensal. Além disso, não foi necessária alocar equipamentos *AUX* e, de acordo com a Tabela 35, a solução encontrada pelo modelo reduziu o custo total mensal em R\$34.794,00, pois o modelo alocou três operadores *SR* a menos que na prática. Com isso, a redução no número de operadores para este cenário foi três.

O principal motivo da redução do número de operadores *SR* é a mudança na proposta de escala deles durante a jornada de 12 horas. O modelo mostra que se a escala dos operadores *SR* for semelhante à dos outros operadores, a empresa não perde em produtividade e consegue reduzir custos operacionais e reduzir o número de contratações em três para os cenários futuros pós expansão.

Tabela 35 – Resultados do Cenário 8

Resultado	Atual	Modelo	Diferença (Modelo - Atual)
<i>AUX</i> utilizado	–	–	–
<i>K</i> utilizado	120	120	0
<i>JR</i>	90	90	0
<i>PL</i>	45	45	0
<i>SR</i>	18	15	-3
<i>J</i> utilizado	153	150	-3
Custo Total	R\$ 978.579,00	R\$ 943.785,00	R\$ -34.794,00
Tempo(s)	–	8.318,25	–
Gap (%)	–	0,00	–

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 36 ilustra a escala criada para este cenário. Nesta escala, 90 dos 150 operadores escalados realizam a jornada com a primeira e a última escala fracionada. Ou seja, eles descansam 3 períodos como todos os outros, porém eles iniciam nos equipamentos propostos 4 vezes ao invés de 3 por jornada de 12 horas.

Tabela 36 – Escala Carrossel para o Cenário 8

k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	62	86	86	86	86	32	32	32	32	13	13	13	13	12	12
2	23	23	62	62	62	62	73	73	73	73	70	70	70	70	38
3	70	70	70	70	4	4	4	4	21	21	21	21	3	3	3
4	46	46	2	2	2	2	85	85	85	85	44	44	44	44	5
5	27	27	27	27	5	5	5	5	69	69	69	69	25	25	25
6	67	67	67	82	82	82	82	9	9	9	9	22	22	22	22
7	9	22	22	22	22	33	33	33	33	4	4	4	4	46	46
8	47	58	58	58	58	84	84	84	84	49	49	49	49	89	89
9	54	73	73	73	73	44	44	44	44	67	67	67	67	11	11
10	55	55	55	55	10	10	10	10	89	89	89	89	37	37	37
11	17	17	17	17	42	42	42	42	12	12	12	12	35	35	35
12	16	61	61	61	61	90	90	90	90	76	76	76	76	83	83
13	52	52	54	54	54	54	22	22	22	22	17	17	17	17	36
14	16	20	20	20	20	26	26	26	26	10	10	10	10	21	21
15	71	71	57	57	57	57	20	20	20	20	33	33	33	33	7
16	28	28	16	16	16	16	68	68	68	68	56	56	56	56	75
17	12	12	37	37	37	37	74	74	74	74	26	26	26	26	15
18	5	5	5	83	83	83	83	2	2	2	2	1	1	1	1
19	15	15	15	28	28	28	28	35	35	35	35	79	79	79	79
20	38	38	38	11	11	11	11	3	3	3	3	58	58	58	58
21	29	63	63	63	63	17	17	17	17	78	78	78	78	31	31
22	2	65	65	65	65	51	51	51	51	42	42	42	42	24	24
23	75	75	75	87	87	87	87	66	66	66	66	85	85	85	85
24	24	24	47	47	47	47	63	63	63	63	32	32	32	32	14
25	66	81	81	81	81	27	27	27	27	53	53	53	53	60	60
26	25	79	79	79	79	40	40	40	40	5	5	5	5	71	71
27	43	74	74	74	74	70	70	70	70	38	38	38	38	23	23
28	21	21	16	16	16	16	34	34	34	34	84	84	84	84	53
29	82	82	50	50	50	50	39	39	39	39	45	45	45	45	10
30	49	49	49	12	12	12	12	43	43	43	43	64	64	64	64
31	50	34	34	34	34	19	19	19	19	15	15	15	15	77	77
32	53	53	53	69	69	69	69	50	50	50	50	74	74	74	74
33	10	10	10	21	21	21	21	57	57	57	57	39	39	39	39
34	69	69	66	66	66	66	64	64	64	64	19	19	19	19	4
35	33	33	33	33	48	48	48	48	82	82	82	82	66	66	66
36	87	87	3	3	3	3	58	58	58	58	6	6	6	6	42
37	72	39	39	39	39	6	6	6	6	80	80	80	80	41	41
38	3	68	68	68	68	8	8	8	8	14	14	14	14	82	82
39	13	13	13	71	71	71	71	62	62	62	62	73	73	73	73
40	35	1	1	1	1	56	56	56	56	36	36	36	36	52	52
41	6	6	6	6	14	14	14	14	28	28	28	28	29	29	29
42	40	40	40	40	38	38	38	38	41	41	41	41	57	57	57
43	45	45	45	45	75	75	75	75	77	77	77	77	43	43	43
44	37	64	64	64	64	45	45	45	45	75	75	75	75	28	28
45	4	4	4	77	77	77	77	88	88	88	88	81	81	81	81
46	84	84	84	84	76	76	76	76	46	46	46	46	16	16	16
47	77	77	72	72	72	72	59	59	59	59	30	30	30	30	48
48	8	8	8	8	80	80	80	80	52	52	52	52	16	16	16
49	19	19	19	19	15	15	15	15	31	31	31	31	2	2	2
50	56	56	56	56	53	53	53	53	87	87	87	87	50	50	50
51	83	83	25	25	25	25	79	79	79	79	40	40	40	40	13
52	32	32	32	32	13	13	13	13	23	23	23	23	54	54	54
53	89	89	88	88	88	88	86	86	86	86	51	51	51	51	76
54	30	30	30	30	49	49	49	49	71	71	71	71	47	47	47
55	80	80	80	60	60	60	60	29	29	29	29	20	20	20	20
56	90	90	90	90	78	78	78	78	24	24	24	24	9	9	9
57	78	78	78	24	24	24	24	54	54	54	54	86	86	86	86
58	31	31	35	35	35	35	1	1	1	1	27	27	27	27	78
59	51	51	51	51	36	36	36	36	11	11	11	11	62	62	62
60	36	36	36	31	31	31	31	37	37	37	37	63	63	63	63

Fonte: Autoria própria.

Tabela 37 – Escala Carrossel para o Cenário 8 (continuação)

	k/t	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>TT</i>	61	26	26	26	26	67	67	67	67	60	60	60	60	72	72	72
	62	41	41	9	9	9	9	81	81	81	81	90	90	90	90	80
	63	7	7	7	89	89	89	89	16	16	16	16	59	59	59	59
	64	11	11	29	29	29	29	61	61	61	61	55	55	55	55	49
	65	44	44	44	44	7	7	7	83	83	83	83	83	88	88	88
	66	57	59	59	59	59	30	30	30	30	7	7	7	7	69	69
	67	76	76	76	41	41	41	41	16	16	16	16	68	68	68	68
	68	48	48	48	52	52	52	52	72	72	72	72	34	34	34	34
	69	14	14	14	46	46	46	46	47	47	47	47	65	65	65	65
	70	42	42	42	23	23	23	23	25	25	25	25	61	61	61	61
	71	60	60	43	43	43	43	65	65	65	65	8	8	8	8	67
	72	88	85	85	85	85	55	55	55	55	48	48	48	48	87	87
<i>RTG</i>	73	112	112	115	115	115	115	136	136	136	136	101	101	101	101	110
	74	108	108	108	127	127	127	127	116	116	116	116	119	119	119	119
	75	132	132	132	120	120	120	120	130	130	130	130	111	111	111	111
	76	109	109	116	116	116	116	114	114	114	114	113	113	113	113	132
	77	135	135	130	130	130	130	137	137	137	137	102	102	102	102	103
	78	140	140	140	140	103	103	103	103	120	120	120	120	107	107	107
	79	116	114	114	114	114	122	122	122	122	143	143	143	143	134	134
	80	101	101	101	101	108	108	108	108	109	109	109	109	116	116	116
	81	104	104	104	104	110	110	110	110	135	135	135	135	138	138	138
	82	130	137	137	137	137	104	104	104	104	108	108	108	108	128	128
	83	124	124	129	129	129	129	119	119	119	119	141	141	141	141	139
	84	144	144	144	144	123	123	123	123	134	134	134	134	115	115	115
	85	134	134	145	145	145	145	133	133	133	133	126	126	126	126	125
	86	139	139	139	135	135	135	135	115	115	115	115	117	117	117	117
	87	105	105	105	109	109	109	109	118	118	118	118	137	137	137	137
	88	125	125	125	106	106	106	106	129	129	129	129	133	133	133	133
	89	103	103	103	134	134	134	134	138	138	138	138	131	131	131	131
	90	129	111	111	111	111	144	144	144	144	125	125	125	125	135	135
	91	128	128	107	107	107	107	117	117	117	117	144	144	144	144	123
	92	123	123	123	128	128	128	128	142	142	142	142	136	136	136	136
	93	145	136	136	136	136	126	126	126	126	132	132	132	132	120	120
	94	120	120	142	142	142	142	131	131	131	131	122	122	122	122	105
	95	122	122	122	122	125	125	125	125	128	128	128	128	130	130	130
	96	118	117	117	117	117	140	140	140	140	103	103	103	103	109	109
	97	143	143	143	124	124	124	124	107	107	107	107	114	114	114	114
	98	142	133	133	133	133	101	101	101	101	139	139	139	139	106	106
	99	106	106	118	118	118	118	121	121	121	121	104	104	104	104	143
	100	126	126	126	126	132	132	132	132	124	124	124	124	129	129	129
	101	138	121	121	121	121	102	102	102	102	105	105	105	105	124	124
<i>EV</i>	102	115	131	131	131	131	113	113	113	113	110	110	110	110	112	112
	103	102	102	102	102	143	143	143	143	127	127	127	127	118	118	118
	104	127	127	138	138	138	138	111	111	111	111	140	140	140	140	108
<i>RS</i>	105	141	141	141	141	105	105	105	105	112	112	112	112	142	142	142
	106	107	119	119	119	119	141	141	141	141	123	123	123	123	127	127
	107	110	110	110	112	112	112	112	145	145	145	145	121	121	121	121
	108	113	113	113	113	139	139	139	139	106	106	106	106	145	145	145
<i>PT</i>	109	164	164	164	164	163	163	163	163	171	171	171	171	168	168	168
	110	165	165	165	165	167	167	167	167	175	175	175	175	166	166	166
	111	166	170	170	170	173	173	173	173	173	163	163	163	163	175	175
	112	171	171	161	161	161	161	170	170	170	170	165	165	165	165	169
	113	175	175	166	166	166	166	172	172	172	172	164	164	164	164	167
	114	161	174	174	174	174	165	165	165	165	169	169	169	169	171	171
	115	168	172	172	172	172	164	164	164	164	167	167	167	167	162	162
	116	162	162	168	168	168	168	174	174	174	173	173	173	173	173	163
	117	173	173	173	173	169	169	169	169	162	162	162	162	161	161	161
	118	167	167	167	175	175	175	175	161	161	161	161	170	170	170	170
	119	163	163	163	171	171	171	171	166	166	166	166	172	172	172	172
	120	169	169	169	162	162	162	162	168	168	168	168	174	174	174	174

Fonte: Autoria própria.

4.9 Análise dos resultados

Um resumo dos resultados obtidos em todos os cenários é apresentado na Tabela 38. É possível notar que, em oito cenários propostos, quatro tiveram resultados positivos (cenários 2, 4, 6 e 8), dois atenderam às expectativas operacionais (cenários 1 e 5) e dois podem ser considerados críticos devido ao aumento de custo gerado para se realizar a escala carrossel (cenários 3 e 7). No entanto, é importante que se compare apenas cenários de mesma quantidade total de equipamentos.

Tabela 38 – Resultado Cenários

Equipamentos					Operadores				Resultado Modelo			
Cenários	TT	RTG*	PT	Total	JR	PL	SR	Total	Custo Total Mensal (R\$)	Tempo(s)	Gap (%)	
1	12	8	–	20	–	–	–	–	–	287,36	0,00	
2	12	6	2	20	–	-3	2	-1	-1.779,00	490,03	0,00	
3	16	12	–	30	2	–	–	2	8.782,00	4.347,60	0,00	
4	16	9	3	30	2	-2	–	–	-7.868,00	3.974,73	0,00	
5	24	16	–	40	–	–	–	–	–	163,02	0,00	
6	24	12	4	40	–	–	-1	-1	-11.598,00	735,03	0,00	
7	39	21	–	60	-3	2	–	-1	3.477,00	46.800,02	1,77**	
8	72	36	12	120	–	–	-3	-3	-34.794,00	8.318,25	0,00	

*Representa o somatório de RTG, EV e RS.

** Conforme demonstrado no cenário 7, apesar do *gap* a solução é a ótima global.

Fonte: Autoria própria.

O comparativo entre os cenários 1 e 2 e os cenários 5 e 6 são semelhantes, visto que os cenários com equipamentos *PT* têm redução de um operador *JR* e um operador *SR*, respectivamente, na jornada de 12 horas, quando comparados com a quantidade de operadores que a empresa alocaria utilizando a estratégia atual.

Por outro lado, os cenários sem equipamentos *PT* resultaram exatamente na mesma escala que a companhia realizaria para alocar estes operadores nos equipamentos corretos. Portanto, para esses quatro cenários, principalmente o cenário 6, que é muito frequente na companhia, o modelo reduz o custo da operação mensal consideravelmente caso esta escala seja implementada e seguida rotineiramente.

Já os cenários 3 e 4 possuem resultados opostos, o primeiro aumenta o custo total e o segundo reduz o custo total, porém, novamente, o cenário com equipamento *PT* demonstra uma economia em relação aos custos dos operadores alocados na companhia no cenário atual. Além disso, fica evidente o custo extra que a empresa pode ter caso não haja navio em operação e a escala não seja calculada corretamente. Conforme foi demonstrado no cenário 3, nesses casos recomenda-se adicionar dois equipamentos *TT* para que não haja prejuízo e ociosidade na jornada de 12 horas.

O cenário 7, mesmo gerando uma redução de um operador *JR* na escala, deve ser reavaliado e adaptado antes de ser implementado na prática, pois o tempo de execução para chegar na solução ótima é demasiadamente elevado e teria de alocar dois equipamentos *TT* extras para evitar o prejuízo e ociosidade na alocação desta escala durante a jornada de 12 horas.

Por fim, o cenário 8 demonstra o ganho que a escala carrossel pode gerar nas contratações de novos colaboradores para o período de operação do porto pós expansão, quando for necessário operar 12 equipamentos *PT* simultaneamente. Ou seja, este cenário garante que a equipe não perde efetividade quando todos os operadores realizam o mesmo tipo de escala. Através dessa alteração na escala dos operadores *SR* é possível reduzir R\$ 34.794,00 de custo mensal por equipe, representando uma redução de custos de R\$ 139.176,00, ou R\$ 1.670.112,00 anuais.

5 CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho, que abordou a utilização de ferramentas computacionais para solucionar um problema prático de alocação de colaboradores em um terminal portuário - Porto Itapoá - na região de Santa Catarina, foram transcritos os conceitos e as metodologias encontrados na literatura para se resolver problemas deste porte e adotou-se a programação linear inteira como método de resolução, pois ajustou-se à modelagem do problema em questão.

Foi verificado a necessidade de otimizar a alocação de colaboradores na empresa em estudo a fim de minimizar erros humanos e elevar o nível de serviço constantemente. Com isso, para que se pudesse entender melhor as dificuldades encontradas na prática, foi necessário compreender o escopo da operação de equipamentos para movimentação de cargas em terminais portuários para, posteriormente, poder reconhecer o problema no terminal em questão e contribuir com uma solução aplicável no cenário atual e futuro da companhia.

Foi possível desenvolver um modelo matemático de otimização para representar o problema de escala de operadores no terminal, no qual evidencia o excelente trabalho da equipe operacional do Porto Itapoá ao desenvolver um fator de rendição capaz de desenhar uma escala que consegue competir com um modelo matemático em alguns cenários. Este fator de rendição foi muito útil no decorrer do trabalho para que fosse possível comparar os resultados do modelo enquanto as soluções ótimas ainda não haviam sido encontradas.

O fator de rendição de 1,25, equivalente a proporção de cinco operadores a cada quatro equipamentos, é uma aproximação contínua para o resultado da alocação em grande escala. No entanto, como o problema de alocação é um problema inteiro, não é aconselhável utilizar um fator contínuo para obter soluções exatas das quais o resultado precisaria ser arredondado, apesar de alguns cenários terem encontrado a solução ótima inteira igual à solução relaxada.

Deste modo, foi possível identificar que a empresa pode ter muitos ganhos, entretanto, é necessário que a escala dos operadores SR seja a mesma dos operadores JR e PL , caso contrário, os ganhos ilustrados no capítulo anterior não serão possíveis de serem realizados.

O desempenho do modelo foi considerado satisfatório para alguns cenários, como a resolução de um modelo exato de mais de 400 mil variáveis em dois horas. Porém, um dos modelos exigiu um tempo extremamente elevado para atingir um *gap*

de 1,77% em relação à solução ótima relaxada.

Além disso, sabe-se que a solução encontrada para corrigir o problema na alocação dos períodos parciais no modelo matemático não é ótima, porém foi a melhor solução encontrada dentro do tempo hábil para realizar o trabalho.

É possível concluir, portanto, que o objetivo geral do trabalho foi atingido ao estabelecer a escala de operadores de equipamentos para movimentação de cargas no Porto Itapoá e minimizar as despesas com recursos humanos, independentemente do tipo de equipamento e da habilidade dos operadores.

5.1 Resultado indireto da escala carrossel

Um dos principais objetivos do Porto Itapoá ao realizar a escala quatro por quatro é agregar valor para o colaborador da área operacional, pois a sua satisfação é tão importante quanto o resultado que este pode gerar para a empresa. Com isso, além da busca por otimizar a escala dos operadores do Porto Itapoá, um dos objetivos indiretos deste projeto é balancear a carga de trabalho de todos os operadores, inclusive o esforço físico excessivo gerado por subir e descer degraus dos equipamentos, principalmente dos equipamentos *RTG* que, conforme citado na introdução, possui 108 degraus.

Na escala atual, os operadores titulares sobem e descem os equipamentos três a quatro vezes dependendo do equipamento no qual este foi alocado para iniciar a jornada, equivalente a 648 e 864 degraus, respectivamente. Já os operadores rendedores sobem e descem os equipamentos 12 vezes durante a jornada de 12 horas, que equivalem a 2.592 degraus subidos e descidos.

Sabendo-se que cada movimento de subir e descer escadas dura, em média, três minutos, os operadores titulares desperdiçam nove a 12 minutos de produtividade e os rendedores desperdiçam 36 minutos de produtividade somente em deslocamento vertical nos equipamentos.

Os resultados obtidos no modelo de escala carrossel proposto neste trabalho, portanto, garantem que 60% dos operadores irão subir e descer os equipamentos quatro vezes durante uma jornada de 12 horas de trabalho, enquanto que 40% irão subir e descer os equipamentos três vezes. Isso significa que todos os operadores desperdiçarão, no máximo, 12 minutos em deslocamento vertical e subirão e descerão 864 degraus durante a jornada de 12 horas.

5.2 Trabalhos futuros

Este trabalho é uma oportunidade de demonstrar às empresas a importância e a necessidade de investir em recursos humanos qualificados, com formação adequada,

capaz de resolver problemas complexos sem a necessidade de contratação de consultores externos para melhorar a competitividade da companhia no mercado.

Além disso, a partir deste trabalho, futuros estudos podem ser desenvolvidos para melhorar a solução encontrada no modelo ou até mesmo melhorar o próprio modelo. Deste modo, uma sugestão é a inclusão de uma restrição que permita que a escala possa ser modificada durante a operação sem afetar a carga de trabalho dos operadores escalados.

Um exemplo disso, é a chegada inesperada de um navio com muitos movimentos. Nesse caso, a inserção dos dados poderia ser somente a quantidade de movimentos que o navio irá realizar, o restante o modelo poderia calcular automaticamente.

Uma segunda proposta é a resolução deste modelo através de métodos heurísticos, os quais podem não fornecem a solução ótima, mas permitem a obtenção de soluções de boa qualidade em tempo computacional reduzido. A partir disso, é possível gerar uma escala ainda maior para todos os setores da empresa que poderiam realizar a escala 4 por 4, incluindo áreas como o *gate* e armazém.

Além de todas as aplicações práticas esse modelo pode ser útil como referência para estudos futuros para o problema de alocação de colaboradores no setor portuário, visto que a maioria dos problemas solucionados até a proposta deste estudo abordaram contextos distintos em diferentes áreas do conhecimento.

REFERÊNCIAS

- AICKELIN, U.; BURKE, E. K.; LI, J. An evolutionary squeaky wheel optimization approach to personnel scheduling. **IEEE Transactions on evolutionary computation**, IEEE, v. 13, n. 2, p. 433–443, 2009.
- ALFARES, H. K. An efficient two-phase algorithm for cyclic days-off scheduling. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 25, n. 11, p. 913–923, 1998.
- ALFARES, H. K. Survey, categorization, and comparison of recent tour scheduling literature. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 127, n. 1-4, p. 145–175, 2004.
- BARD, J. F.; BINICI, C.; SILVA, A. H. d. Staff scheduling at the united states postal service. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 745–771, 2003.
- BARD, J. F.; PURNOMO, H. W. A column generation-based approach to solve the preference scheduling problem for nurses with downgrading. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 193–213, 2005a.
- BARD, J. F.; PURNOMO, H. W. Preference scheduling for nurses using column generation. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 164, n. 2, p. 510–534, 2005b.
- BESTER, M.; NIEUWOUDT, I.; VAN VUUREN, J. H. Finding good nurse duty schedules: a case study. **Journal of Scheduling**, Springer, v. 10, n. 6, p. 387–405, 2007.
- BHATNAGAR, R.; SADDIKUTTI, V.; RAJGOPALAN, A. Contingent manpower planning in a high clock speed industry. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 45, n. 9, p. 2051–2072, 2007.
- BRASIL. **Agência Nacional de Transportes Aquaviários**. 2016. Disponível em: <<http://portal.antaq.gov.br/>>. Acesso em: 17/10/2016.
- BRUCKER, P. et al. A shift sequence based approach for nurse scheduling and a new benchmark dataset. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 16, n. 4, p. 559–573, 2010.
- BRUECKER, P. D. et al. Workforce planning incorporating skills: State of the art. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 243, n. 1, p. 1–16, 2015.
- CAI, X.; LI, K. A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 125, n. 2, p. 359–369, 2000.
- CARRASCO, R. C. Long-term staff scheduling with regular temporal distribution. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 191–199, 2010.
- CASTILLO, I.; JORO, T.; LI, Y. Y. Workforce scheduling with multiple objectives. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 196, n. 1, p. 162–170, 2009.

- CASTILLO-SALAZAR, A.; LANDA-SILVA, D.; QU, R. A survey of workforce scheduling and routing. In: SPRINGER. **9th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling**. [S.l.], 2012.
- CAUSMAECKER, P. D.; BERGHE, G. V. A categorisation of nurse rostering problems. **Journal of Scheduling**, Springer, v. 14, n. 1, p. 3–16, 2011.
- COROMINAS, A.; OLIVELLA, J.; PASTOR, R. Capacity planning with working time accounts in services. **Journal of the Operational Research Society**, Nature Publishing Group, v. 61, n. 2, p. 321–331, 2010.
- DANTZIG, G. B. Letter to the editor-a comment on edie's "traffic delays at toll booths". **Journal of the Operations Research Society of America**, INFORMS, v. 2, n. 3, p. 339–341, 1954.
- DETENNE, B. et al. Cut generation for an employee timetabling problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 197, n. 3, p. 1178–1184, 2009.
- DREZET, L.-E.; BILLAUT, J.-C. A project scheduling problem with labour constraints and time-dependent activities requirements. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 112, n. 1, p. 217–225, 2008.
- EITZEN, G.; PANTON, D.; MILLS, G. Multiskilled workforce optimisation. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 127, n. 1-4, p. 359–372, 2004.
- ERNST, A. T. et al. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 153, n. 1, p. 3–27, 2004.
- FIRAT, M.; HURKENS, C. An improved mip-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem. **Journal of Scheduling**, Springer, v. 15, n. 3, p. 363–380, 2012.
- GÜNTHER, M.; NISSEN, V. Particle swarm optimization and an agent-based algorithm for a problem of staff scheduling. In: SPRINGER. **European Conference on the Applications of Evolutionary Computation**. [S.l.], 2010.
- GUROBI OPTIMIZATION, INC. **Gurobi Optimizer Reference Manual**. 2016. Disponível em: <<http://www.gurobi.com>>.
- HEIMERL, C.; KOLISCH, R. Scheduling and staffing multiple projects with a multi-skilled workforce. **OR spectrum**, Springer, v. 32, n. 2, p. 343–368, 2010.
- HELBER, S.; HENKEN, K. Profit-oriented shift scheduling of inbound contact centers with skills-based routing, impatient customers, and retries. **Or Spectrum**, Springer, v. 32, n. 1, p. 109–134, 2010.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. [S.l.]: McGraw Hill, 2013.
- HUANG, H.-C. et al. Simman—a simulation model for workforce capacity planning. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 36, n. 8, p. 2490–2497, 2009.
- ISKEN, M. W. An implicit tour scheduling model with applications in healthcare. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 128, n. 1, p. 91–109, 2004.

KIM, K. H. et al. Operator-scheduling using a constraint satisfaction technique in port container terminals. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier, v. 46, n. 2, p. 373–381, 2004.

KRISHNAMOORTHY, M.; ERNST, A. T.; BAATAR, D. Algorithms for large scale shift minimisation personnel task scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 219, n. 1, p. 34–48, 2012.

LI, N.; LI, L. X. Modeling staffing flexibility: A case of china. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 124, n. 2, p. 255–266, 2000.

MAENHOUT, B.; VANHOUCKE, M. An integrated nurse staffing and scheduling analysis for longer-term nursing staff allocation problems. **Omega**, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 485–499, 2013.

MICROSOFT. **Microsoft Office Excel**. 2016.

MICROSOFT. **Microsoft Visual Studio**. 2017.

MOHAN, S. Scheduling part-time personnel with availability restrictions and preferences to maximize employee satisfaction. **Mathematical and Computer Modelling**, Elsevier, v. 48, n. 11–12, p. 1806 – 1813, 2008.

PASTOR, R.; COROMINAS, A. A bicriteria integer programming model for the hierarchical workforce scheduling problem. **Journal of modelling in management**, Emerald Group Publishing Limited, v. 5, n. 1, p. 54–62, 2010.

PORTO ITAPOÁ. **Porto Itapoá**. 2016. Disponível em: <<http://www.portoitapoa.com.br/>>. Acesso em: 23/09/2016.

ROCHA, M. S. F. S. **The staff scheduling problem: a general model and applications**. 173 p. Tese (Doutorado) — Program in Industrial Engineering and Management, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

RONG, A. Monthly tour scheduling models with mixed skills considering weekend off requirements. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 334–343, 2010.

SADJADI, S. et al. A new nonlinear stochastic staff scheduling model. **Scientia Iranica**, Elsevier, v. 18, n. 3, p. 699–710, 2011.

SAMPSON, S. E. Optimization of volunteer labor assignments. **Journal of Operations Management**, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 363–377, 2006.

SEÇKINER, S. U.; GÖKÇEN, H.; KURT, M. An integer programming model for hierarchical workforce scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 183, n. 2, p. 694–699, 2007.

SILVA, S. I. C. T. **Gestão da Manutenção de Equipamentos Portuários**. Dissertação (Mestrado) — Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2014.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8ed. [S.l.]: Sao Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TECHAWIBOONWONG, A.; YENRADEE, P.; DAS, S. K. A master scheduling model with skilled and unskilled temporary workers. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 103, n. 2, p. 798–809, 2006.

THOMPSON, G. M.; GOODALE, J. C. Variable employee productivity in workforce scheduling. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 170, n. 2, p. 376–390, 2006.

TIWARI, V.; PATTERSON, J. H.; MABERT, V. A. Scheduling projects with heterogeneous resources to meet time and quality objectives. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 193, n. 3, p. 780–790, 2009.

TOTTERDELL, P. Work schedules. **Handbook of work stress**, Sage Thousand Oaks, CA, p. 35–62, 2005.

WARNER, D. M. Scheduling nursing personnel according to nursing preference: A mathematical programming approach. **Operations Research**, INFORMS, v. 24, n. 5, p. 842–856, 1976.

WONGWAI, N.; MALAIKRISANACHALEE, S. Augmented heuristic algorithm for multi-skilled resource scheduling. **Automation in Construction**, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 429–445, 2011.

WU, C.-C.; HSU, P.-H.; LAI, K. Simulated-annealing heuristics for the single-machine scheduling problem with learning and unequal job release times. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 30, n. 1, p. 54–62, 2011.

ZÜLCH, G.; ROTTINGER, S.; VOLLSTEDT, T. A simulation approach for planning and re-assigning of personnel in manufacturing. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 90, n. 2, p. 265–277, 2004.